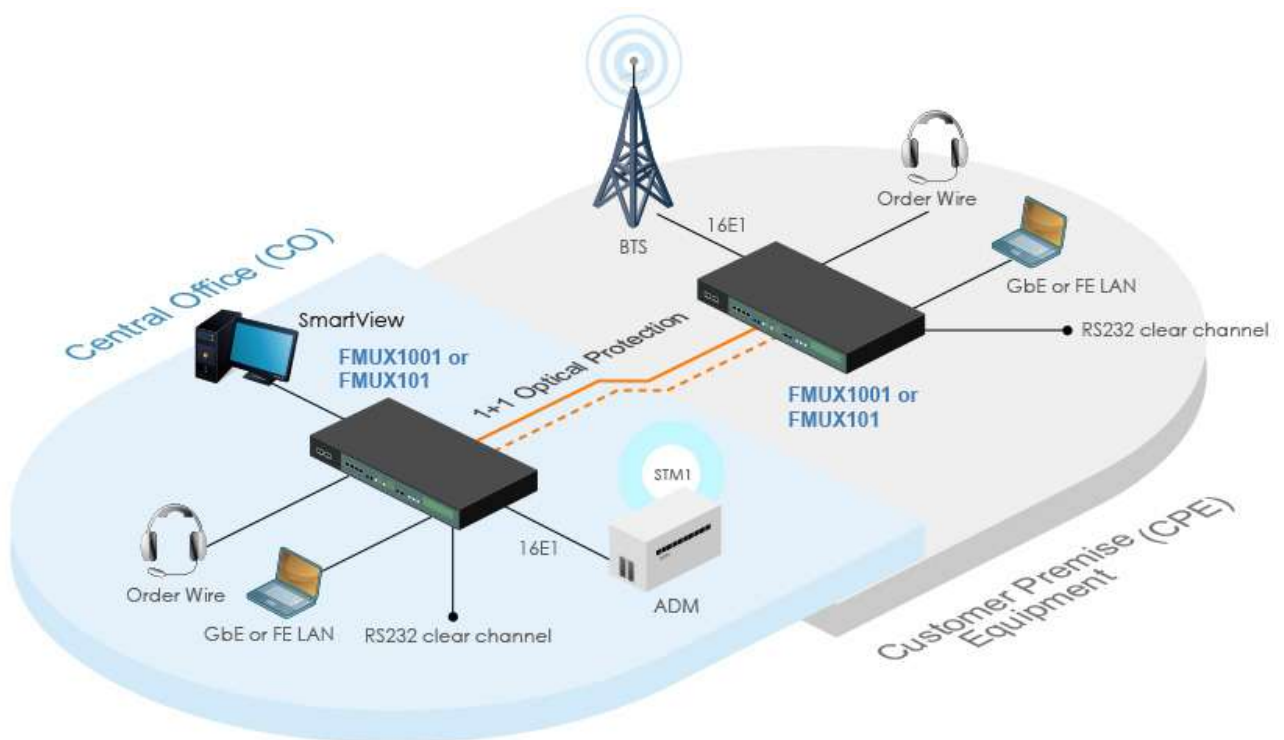


**М. В. Васильківський, Г. Г. Бортник,
Д. В. Михалевський**

Волоконно-оптичні телекомунікаційні технології



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**М. В. Васильківський, Г. Г. Бортник,
Д. В. Михалевський**

Волоконно-оптичні телекомунікаційні технології

Електронний навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2025

УДК 621.0
B90

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (Протокол № 7 від 26.12.2024 р.)

Рецензенти:

В. Г. Крижановський, доктор технічних наук, професор
С. М. Захарченко, кандидат технічних наук, професор
О. В. Осадчук, доктор технічних наук, професор

Васильківський, М. В.

B90 Волоконно-оптичні телекомунікаційні технології : навчальний посібник [Електронний ресурс] / Васильківський М. В., Бортник Г. Г., Михалевський Д. В. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – (PDF, 168 с.)

Навчальний посібник є частиною навчально-методичного комплексу та призначений для підготовки та проведення лекційних занять з дисципліни «Оптичні транспортні системи та мережі». У навчальному посібнику міститься необхідний теоретичний матеріал, лістинги програм та методика оптимізації інфокомунікаційних систем та мереж.

УДК 621.0

© ВНТУ, 2025

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
1 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ОПТИЧНИХ КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	8
1.1 Передумови застосування волоконно-оптичного зв'язку.....	9
1.2 Діапазони оптичних довжин хвиль	15
1.3 Відносні одиниці вимірювання рівнів оптичного сигналу	25
1.4 Технології цифрового мультиплексування	31
1.4.1 Базове мультиплексування телекомунікаційних сигналів.....	32
1.4.2 Ієрархія мультиплексування в SONET/SDH	37
1.4.3 Оптична транспортна мережа (OTN)	39
1.5 Мультиплексування каналів за довжиною хвилі.....	41
1.5.1 Основи WDM.....	42
1.5.2 Мультиплексування з поляризаційним розділенням	44
1.5.3 Просторове мультиплексування оптичних каналів.....	45
1.6 Основні елементи волоконно-оптичних систем	47
1.7 Розвиток волоконно-оптичних мереж.....	54
1.8 Стандарти волоконно-оптичного зв'язку	58
1.9 Висновки	60
1.10 Контрольні завдання	61
2 ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СТРУКТУРИ ТА ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ПОШИРЕННЯ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ.....	65
2.1 Походження оптичних сигналів	66
2.1.1 Поляризація оптичних сигналів.....	67
2.1.2 Лінійна поляризація	70
2.1.3 Еліптична та кругова поляризація	72
2.1.4 Квантові аспекти оптичних сигналів	76
2.2 Основні закони та означення волоконної оптики.....	77
2.2.1 Поняття показника заломлення	78
2.2.2 Основи теорії відбиття та заломлення оптичних сигналів	79
2.2.3 Поляризаційні характеристики оптичних сигналів	85
2.2.4 Поляризаційно-чутливі пристрої.....	88
2.3 Конфігурації та режими оптичних волокон	90
2.3.1 Традиційні типи волокон.....	90
2.3.2 Поняття променів та режимів	94
2.3.3 Структура волокон зі ступінчастим індексом.....	97
2.3.4 Подання променевої оптики.....	97
2.3.5 Оптичні хвилі у хвилеводі з діелектричної пластини	104
2.4 Режими в круглих хвилеводах	106
2.4.1 Основні поняття модових режимів.....	107
2.4.2 Довжина хвилі зрізу та нормована частота	110

2.4.3 Оптична потужність у волокнах зі ступінчастим індексом.....	119
2.4.4 Лінійно поляризовані моди	122
2.5 Одномодові волокна.....	124
2.5.1 Будова SMF	124
2.5.2 Визначення діаметра модового поля.....	127
2.5.3 Походження подвійного заломлення променя.....	130
2.5.4 Ефективний показник заломлення	132
2.6 Волокна з градієнтним індексом	133
2.6.1 Структура осердя волокон з градієнтним індексом	134
2.6.2 Числова апертура волокна GI	134
2.6.3 Умови відсікання у волокнах GI.....	137
2.7 Матеріали оптичних волокон.....	137
2.7.1 Скляні оптичні волокна	138
2.7.2 Традиційні технології виготовлення оптичних волокон	140
2.7.3 Оптичні волокна з модифікованого скла.....	141
2.7.4 Пластикові оптичні волокна.....	142
2.8 Концепції фотонних кристалічних волокон	143
2.8.1 Індексно-напряме фотонне кристалічне волокно	143
2.8.2 Оптичне волокно з фотонною смугою пропускання.....	145
2.9 Волоконно-оптичні кабелі.....	148
2.9.1 Структури волоконно-оптичних кабелів	148
2.9.2 Конструкції оптичних кабелів для приміщень.....	154
2.9.3 Конструкції оптичних кабелів для зовнішніх застосунків	155
2.10 Висновки	158
2.11 Контрольні завдання	161
ВИСНОВКИ.....	165
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	166

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AGS – Автоматичне регулювання підсилення
AM – Амплітудна модуляція
ANSI – Американський національний інститут стандартів
APD – Лавинний фотодіод
ARQ – Автоматичний запит на повтор
ASE – Посилене спонтанне випромінювання
ASK – Амплітудна маніпуляція
ATM – Асинхронний режим передачі
AWG – Хвилевідна решітка
BER – Коефіцієнт бітових помилок
BS – Базова станція
CAD – Автоматизоване проєктування
CATV – Кабельне телебачення
CNR – Відношення несуча/шум
CO – Центральний офіс
CRC – Циклічна перевірка резервування
CS – Станція управління
DBA – Динамічне виділення смуги пропускання
DCE – Динамічний канальний еквалайзер
DCF – Дисперсійно-компенсувальне волокно
DCM – Модуль дисперсійної компенсації
DFA – Підсилювач на легованому волокні
DGD – Диференціальна групова затримка
DPSK – Диференціальна фазова маніпуляція
DQPSK – Диференціальна квадратурна фазова маніпуляція
DR – Динамічний діапазон
DS – Цифрова система
DSF – Дисперсійно-зміщене волокно
DWDM – Щільне мультиплексування з поділом по довжині хвилі

ВСТУП

Оптоволоконна технологія відіграє критично важливу роль у сучасних телекомунікаційних мережах, і її вплив на різні сфери життя важко переоцінити. Наведемо кілька ключових аспектів, що підкреслюють цю важливість.

1. Оптоволоконні мережі забезпечують значно вищу пропускну спроможність порівняно з традиційними мідними кабелями. Це дозволяє ефективно передавати великі обсяги даних, які потрібні для таких послуг, як потокове відео в HD та 4K, відеоконференції та онлайн-ігри.

2. Оптоволокно забезпечує мінімальні затримки в передачі даних, що є критично важливим для застосувань у реальному часі, таких як телемедицина та дистанційна освіта. Це дозволяє проводити консультації та навчальні сесії без значних затримок.

3. Волоконно-оптичні мережі менш схильні до електромагнітних завад і впливів навколишнього середовища, що робить їх більш надійними. Це важливо для забезпечення безперервності зв'язку, особливо в критичних ситуаціях.

4. Волоконно-оптичні технології зазвичай потребують менше енергії для передачі даних на великі відстані, що може привести до зниження витрат на електроенергію та зменшення вуглецевого сліду.

5. Оптоволоконні мережі легко масштабуються, що дозволяє операторам зв'язку швидко реагувати на зростаючі потреби в пропускній спроможності. Це важливо для адаптації до нових технологій та послуг, які з'являються на ринку.

6. Завдяки високій швидкості та надійності, оптоволоконна технологія відкриває можливості для впровадження таких нових технологій, як IoT (інтернет речей), штучний інтелект, значні дані та хмарні обчислення.

Сучасні телекомунікаційні мережі без оптоволоконних технологій просто не можуть задовольнити зростаючі вимоги суспільства. Справді, їхня надійність, швидкість та ефективність роблять оптоволокно незамінним компонентом у забезпеченні доступу до інформації та послуг у всіх сферах життя. З огляду на ці фактори, важливо продовжувати інвестувати в розвиток і вдосконалення інфраструктури оптоволоконних мереж для підтримки майбутніх потреб суспільства [1, 2].

Отже, волоконно-оптичний зв'язок (ВОЗ) стає все більш популярним завдяки своїм численним перевагам. Наведемо основні причини його застосування.

1. Оптичні волокна можуть передавати сигнали на великі відстані без значних втрат сигналу, що робить їх ідеальними для міжміських та міжнародних зв'язків.

2. ВОЗ має менші розміри та вагу порівняно з мідними кабелями, що спрощує їх установлення та економить простір.

3. Оптичні волокна стійкі до впливу вологи, корозії та інших агресивних середовищ, що підвищує їхню довговічність.

4. ВОЗ ускладнює несанкціонований доступ до інформації, оскільки перехоплення сигналу вимагає спеціального обладнання.

5. Виготовлення та експлуатація оптичних волокон має менший вплив на довкілля порівняно з традиційними мідними кабелями.

6. Легкість у встановленні нових з'єднань та розширенні мережі з використанням оптичних волокон дозволяє швидко реагувати на зміну вимог користувачів.

7. ВОЗ підтримує такі сучасні технології, як 5G, IoT та розширену реальність, що вимагають високошвидкісної передачі даних.

Завдяки цим перевагам волоконно-оптичний зв'язок стає основним вибором для сучасних телекомунікаційних мереж і систем зв'язку [5].

Фотоніка як наука, що вивчає генерацію, маніпулювання та виявлення світла, є ключовою для розвитку волоконно-оптичних технологій. Основні принципи фотоніки базуються на властивостях світла як електромагнітної хвилі, а також на поведінці фотонів – частинок світла.

Оптичний сигнал може розглядатись як хвиля, що характеризується довжиною хвилі, частотою та амплітудою. Ці параметри визначають колір світла в видимому спектрі, а також його енергію. Світло також має корпускулярний характер, що проявляється в поведінці фотонів, які можуть взаємодіяти з матеріями, передаючи енергію.

Коли світло проходить через такий діелектричний матеріал, як скло, основними явищами, що визначають його поведінку, є заломлення і відбиття. Заломлення відбувається, коли світло переходить з одного середовища в інше, змінюючи свою швидкість і напрямок. Закон Снелла описує цю поведінку.

Волоконно-оптичні кабелі складаються з центрального осердя (зазвичай зі скла або пластику), в оболонці з нижчим показником заломлення. Це створює умови для тотального внутрішнього відбиття, що дозволяє світловим сигналам залишатися в межах сердечника (осердя) та поширюватися на великі відстані без значних втрат.

Основні принципи, які діють в оптичному волокні. Коли світло досягає межі між сердечником і оболонкою під певним кутом, воно відбивається всередині сердечника замість того, щоб проходити в оболонку. Світло може поширюватися різними шляхами або «модами» в волокні, що впливає на його швидкість і якість сигналу. Залежно від конструкції волокна, воно може бути одно- або мультимодним. Загасання є зменшенням потужності світлового сигналу внаслідок розсіювання, поглинання та інших факторів. Якісне виготовлення волокон і використання матеріалів з низьким загасанням є критично важливими для досягнення високої продуктивності волоконно-оптичних систем. Розуміння цих основних принципів є важливим для проектування та оптимізації волоконно-оптичних систем, що використовуються в сучасних комунікаційних мережах. Фотоніка забезпечує потрібні інструменти та технології для подальшого розвитку цієї галузі, дозволяючи реалізувати швидкісні та надійні системи зв'язку [6].

1 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ОПТИЧНИХ КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Оптоволоконні мережі мають численні переваги, які роблять їх привабливими для сучасних комунікаційних систем. Наведемо основні з них. Оптоволоконні кабелі здатні передавати величезні обсяги даних на високих швидкостях, що робить їх ідеальними для інтернет-провайдерів і великих компаній. Завдяки своїй структурі, оптоволоконні мережі забезпечують мінімальні затримки при передачі даних, що є критично важливим для таких застосунків у реальному часі, як VoIP та відеоконференції. Оптоволокно не підлягає впливу електромагнітних полів, що забезпечує стабільність сигналу і знижує ризик втрати даних. Оптоволоконні мережі можуть передавати сигнали на значні відстані без значного погіршення якості, що знижує потребу в повторювачах. Оптоволоконні кабелі є легшими і тоншими, ніж мідні, що спрощує їх прокладання і знижує витрати на транспортування та встановлення. Оптоволокно не піддається корозії і може бути використане в різних погодних умовах. Хоча первісні витрати на встановлення оптоволоконних мереж можуть бути вищими, їх експлуатаційні витрати значно нижчі на великих відстанях завдяки меншим витратам на обслуговування та енергію. Оптоволоконні мережі важче піддати перехопленню, що робить їх більш безпечними порівняно з мідними кабелями. Оптоволокно дозволяє використовувати різні технології мультиплексування (наприклад, WDM), що підвищує ефективність використання каналу. Оптоволоконні мережі не генерують електромагнітне випромінювання, що робить їх ідеальними для використання в чутливих або медичних системах. Вказані переваги роблять волоконно-оптичні мережі оптимальним вибором для багатьох застосунків, зокрема інтернет-провайдерів, корпоративних мереж, освітніх установ та інших сфер, де потрібна висока швидкість і надійність передачі даних [1].

Оптоволоконні мережі мають безліч переваг, але також і певні недоліки. Наведемо основні з них.

Вартість устаткування:

- високі початкові витрати на прокладання оптоволоконних кабелів і обладнання;
- спеціалізоване обладнання та інструменти для монтажу вимагають додаткових витрат.

Вразливість до механічних пошкоджень:

- оптоволокно може бути пошкоджене внаслідок фізичних впливів (наприклад, копання, тиск);
- спеціальні заходи безпеки необхідні для запобігання пошкодженням.

Складність ремонту:

- ремонт оптоволоконних ліній може бути складним і трудомістким;

- вимога до спеціалізованих навичок для виконання ремонту.

Температурні обмеження:

- оптоволоконні кабелі можуть бути чутливими до екстремальних температур, що може впливати на їх продуктивність;

- потреба у спеціальних рішеннях для використання в суворих кліматичних умовах.

Обмежена гнучкість:

- зміни в конфігурації мережі можуть вимагати фізичного переобладнання, що може бути трудомістким;

- використання волоконно-оптичних кабелів може бути менш гнучким, порівняно з мідними кабелями у певних умовах.

Чутливість до перегріву: волоконно-оптичні системи можуть потерпати від втрат сигналу, якщо температура перевищує допустимі межі.

Підвищені вимоги до станційного обладнання:

- потреба у специфічному обладнанні для передачі даних через оптоволоконно, що може збільшити витрати;

- складність інтеграції з існуючими системами.

Труднощі з ремонтом та обслуговуванням: відсутність достатньої кількості фахівців для обслуговування і ремонту оптоволоконних мереж у деяких регіонах.

Вказані недоліки можуть впливати на рішення про вибір технології для конкретних застосувань, хоча багато з них компенсуються такими перевагами оптоволоконних мереж, як висока швидкість передачі даних і низькі втрати сигналу.

1.1 Передумови застосування волоконно-оптичного зв'язку

Оптичні волокна стали основою сучасних телекомунікаційних систем завдяки своїм численним перевагам.

Оптичні волокна здатні передавати величезні обсяги даних на великі відстані без значних втрат. Пропускна спроможність може досягати терабіт на секунду завдяки використанню різних технологій модуляції. Втрати при передачі сигналу по оптичному волокну значно нижчі, ніж у мідних кабелях. Це дозволяє передавати дані на великі відстані без потреби частого підсилення сигналу. Оптичні волокна не піддаються впливу електромагнітних завад, що забезпечує стабільну та надійну передачу даних. Оптичні волокна легші та тонші за мідні кабелі, що полегшує їх прокладання і зменшує витрати на інфраструктуру. Оптичні волокна мають тривалий термін служби, що зменшує витрати на обслуговування та модернізацію [2].

Оптичні волокна працюють у різних спектральних діапазонах, найпоширенішими з яких є:

1. Діапазон 850 нм, який використовується для короткочасних з'єднань, зазвичай у межах одного будинку чи офісу (в основному мультирежимні волокна);

2. Діапазон 1310 нм, який застосовується для середньої відстані, забезпечуючи низькі втрати сигналу. Це один з основних діапазонів для одномодового волокна;

3. Діапазон 1550 нм, який найбільш оптимальний для довгих відстаней, оскільки має найнижчі втрати. Використовується, в основному, для магістральних ліній зв'язку.

Здійснимо аналіз методів, що використовуються для підвищення пропускної спроможності оптичного волокна. Технологія мультиплексування з поділом хвиль (WDM) дозволяє одночасно передавати кілька сигналів на різних довжинах хвиль, що значно збільшує загальну пропускну спроможність волокна. Існує декілька різновидів WDM, таких як CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) і DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Використання нових методів модуляції, таких як QAM (Quadrature Amplitude Modulation), дозволяє передавати більше інформації на тій же довжині хвилі. Технологія поляризаційного мультиплексування передбачає використання обох поляризаційних станів світла для передачі двох незалежних сигналів одночасно. Використання активних елементів для підсилення сигналу на великих відстанях дозволяє зберігати високу якість зв'язку [4].

Оптичне волокно, незважаючи на свою уявну простоту, є одним з найважливіших елементів у волоконно-оптичних лініях зв'язку. Завдяки своїй високій пропускній спроможності, низьким втратам сигналу, імунітету до електромагнітних завад та іншим перевагам, оптичні волокна забезпечують надійний та ефективний спосіб передачі даних у сучасному світі зв'язку. Використання таких різних методів, як WDM і нові технології модуляції, разом із дотриманням міжнародних стандартів, дозволяє постійно підвищувати ефективність та надійність оптоволоконних мереж [6].

Розглянемо структуру оптичного волокна. Осердя є центральною частиною оптичного волокна, де відбувається поширення світла. Стандартний діаметр для одномодового волокна зазвичай становить 9 мкм, в той час як для багатомодового волокна – 50 мкм. Діелектрична оболонка оточує сердцевину і має діаметр 125 мкм. Її матеріал має нижчий показник заломлення, що дозволяє світлу залишатися в сердцевині завдяки явищу повного внутрішнього відбиття. Полімерне буферне покриття з діаметром 250 мкм забезпечує захист від механічних навантажень і зовнішнього впливу. Захисна полімерна оболонка з діаметром 900 мкм інкапсулює всі попередні шари і забезпечує додатковий захист [7].

Оптичне волокно першого покоління, яке використовувалося в 1970-х роках, мало діаметр сердцевини 50 мкм та забезпечувало передачу телефонних сигналів на швидкості близько 6 Мбіт/с на відстані до 10 км. З

розвитком технологій у 1980-х з'явилися системи, які могли передавати дані зі швидкістю понад терабіт на секунду на відстані сотень кілометрів. Це стало можливим завдяки вдосконаленню технологій виготовлення одномодового волокна, яке має менший діаметр серцевини (9 мкм). Оптичні волокна стали основою сучасних систем зв'язку завдяки своїй спроможності передавати великі обсяги даних на великі відстані з високою швидкістю. Розвиток технологій, пов'язаних з виробництвом і конструкцією волокон, продовжує відкривати нові можливості для телекомунікацій, що робить їх важливими для інфраструктури зв'язку в усьому світі.

Оптичні мережі стають все більш популярними через їхні численні переваги, такі як висока пропускна спроможність, низька затримка та стійкість до електромагнітних завад.

Наведемо основні етапи та фактори на шляху до впровадження оптичних мереж.

1. Дослідження та планування:

- визначення вимог до пропускної спроможності, географічного покриття та типів послуг;
- огляд наявних мереж та ресурсів, які можуть бути використані або модернізовані.

2. Вибір технології:

- одномодові та багатомодові волокна. Вибір залежить від відстані та пропускної спроможності;
- вибір таких протоколів, як DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), для збільшення пропускної спроможності.

3. Проєктування мережі:

- визначення структури мережі (лінійна, кільцева, зіркова тощо);
- вибір маршрутизаторів, комутаторів, підсилювачів та іншого обладнання.

4. Встановлення та налаштування:

- прокладання кабелів, забезпечуючи надійне з'єднання;
- конфігурація мережного обладнання для забезпечення оптимальної роботи.

5. Тестування та впровадження:

- перевірка надійності, пропускної спроможності та відсутності помилок;
- введення в експлуатацію з моніторингом для виявлення можливих проблем.

6. Обслуговування та оптимізація:

- відстеження продуктивності та виявлення аномалій;
- можливість модернізації мережі для задоволення зростаючих потреб.

7. Виклики та ризики:

- високі початкові витрати на обладнання та інсталяцію;
- потреба в спеціалізованих знаннях для монтажу та обслуговування;

- вибір між оптичними, бездротовими та іншими мережними технологіями.

8. Перспективи розвитку:

- інтеграція оптичних мереж з новими бездротовими технологіями;
- використання оптичних мереж для забезпечення інфраструктури для IoT і розумних послуг.

Оптичні мережі мають великий потенціал для трансформації телекомунікаційних послуг, забезпечуючи швидкий і надійний доступ до інформації та ресурсів. Успішне впровадження таких мереж потребує ретельного планування, вибору технологій та постійного обслуговування.

На рисунку 1.1 показана схема загальної структури оптичного волокна.

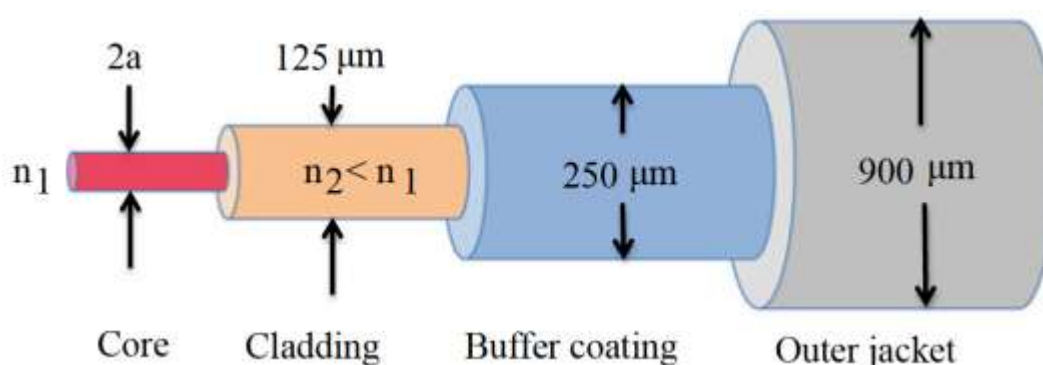


Рисунок 1.1 – Схема типової структури оптичного волокна; номінальні діаметри серцевини $2a = 9$ мкм для одномодових і 50 мкм для багатомодових волокон

Широка доступність Інтернету та розвиток віддалено доступних прикладних програм і інформаційних баз даних дійсно спричинили різке зростання використання ПК і мобільних пристроїв. Це створило значний попит на високошвидкісні телекомунікаційні послуги, які мають задовольняти потреби як окремих користувачів, так і великих підприємств та дослідницьких організацій. Відповіддю на цей попит стало суттєве збільшення пропускної спроможності волоконно-оптичних ліній, що стало можливим завдяки кільком ключовим технологічним досягненням [8].

Розглянемо основні методи збільшення пропускної спроможності волоконно-оптичних ліній. Технологія Wavelength Division Multiplexing (WDM) дозволяє передавати кілька незалежних сигналів по одному волокну, кожен з яких використовує свою унікальну довжину хвилі. Завдяки цьому збільшується загальна пропускна спроможність волоконно-оптичної лінії без потреби прокладати додаткові волокна. Використання досконаліших методів модуляції сигналу дозволяє передавати більше інформації на тій самій довжині хвилі. Приклади таких методів: Quadrature Amplitude Modulation (QAM) та Phase Shift Keying (PSK). Вдосконалення

технологій модуляції і кодування дозволяє більш ефективно використовувати доступний спектр. Це охоплює використання багаторівневої модуляції і адаптивних методів кодування, які можуть динамічно змінюватися залежно від умов каналу. Отже, збільшення пропускної спроможності волоконно-оптичних ліній дозволяє телекомунікаційним компаніям забезпечувати швидке і надійне під'єднання для великої кількості користувачів і пристроїв, підтримувати розвиток нових технологій та сервісів, таких як 5G, інтернет речей (IoT) та хмарні обчислення. Це сприяє подальшому зростанню економіки, поліпшенню доступу до інформації та підвищенню якості життя людей [9].

Наведемо кілька основних переваг використання оптичних волокон у телекомунікаційних системах:

- оптичні волокна здатні передавати великі обсяги даних, що робить їх ідеальними для швидкісних мереж;
- порівняно зі звичайними мідними кабелями, оптичні волокна мають набагато менші втрати сигналу на великих відстанях, що дозволяє передавати дані без повторювачів на більші відстані;
- оптичні волокна не піддаються впливу електромагнітних завад, що забезпечує стабільнішу і надійну передачу даних;
- сигнал у оптичних волокнах важче перехопити, оскільки він не випромінює електромагнітні хвилі, що робить їх більш безпечними для передачі конфіденційної інформації;
- оптичні волокна мають менший діаметр і вагу порівняно з мідними кабелями, що полегшує їх установа та зменшує витрати на матеріали;
- оптичні волокна стійкі до корозії та інших факторів навколишнього середовища, що забезпечує тривалий термін служби;
- передача даних через оптичні волокна зазвичай вимагає менше енергії, що робить їх більш екологічно чистими;
- оптичні волокна використовуються в різних сферах (охоплюючи телекомунікації, медицину, промисловість) і навіть у побутовій електроніці;
- оптичні волокна дозволяють досягати дуже високих швидкостей передачі даних, що важливо для таких сучасних додатків, як відеоконференції, потокове відео та інші ресурсоємні сервіси;
- оптичні волокна підтримують технології мультиплексування (наприклад, WDM), що дозволяє передавати кілька потоків даних одночасно через одне волокно, збільшуючи ефективність використання мережі.

Вказані переваги роблять оптичні волокна ключовим елементом сучасних телекомунікаційних мереж і сприяють їхньому постійному розвитку та впровадженню [10]. Наведемо таблицю 1.1 з перевагами використання оптичних волокон у телекомунікаційних мережах.

Таблиця 1.1 – Переваги використання оптичних волокон у телекомунікаційних мережах

Перевага	Опис
Висока пропускна спроможність	Оптичні волокна можуть передавати великі обсяги даних на великих швидкостях, що перевищує можливості мідних кабелів.
Низька затримка	Оптичні сигнали передаються з меншими затримками, що робить їх ідеальними для застосувань, чутливих до часу (наприклад, VoIP, відеоконференції).
Менші втрати сигналу	Оптичні волокна мають нижчий рівень згасання сигналу на великих відстанях порівняно з електричними сигналами в мідних проводах.
Стійкість до електромагнітних завад	Оптичні волокна не піддаються впливу електромагнітних завад, що забезпечує стабільнішу передачу даних.
Легкість та компактність	Оптичні кабелі легші і тонші, ніж мідні, що полегшує їх встановлення та зменшує витрати на матеріали.
Вища безпека	Важче перехопити оптичний сигнал, порівняно з електричним, що підвищує рівень безпеки передачі даних.
Стійкість до корозії	Оптичні волокна не піддаються корозії, що забезпечує їхню тривалу експлуатацію в різних умовах.
Можливість передачі на великі відстані	Оптичні волокна можуть передавати дані на десятки і навіть сотні кілометрів без потреби в повторювачах.
Екологічність	Використання оптичних волокон є більш енергоефективним і менш шкідливим для навколишнього середовища порівняно з традиційними кабелями.
Гнучкість та масштабованість	Легко адаптуються до зростаючих потреб у пропускній спроможності без значних витрат на модернізацію.

Ця таблиця підкреслює ключові переваги використання оптичних волокон у телекомунікаційних мережах, що робить їх популярними для сучасних комунікаційних рішень. Наведемо результати порівняння оптичних волокон з мідними лініями передавання (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Порівняння оптичних волокон з мідними лініями передавання

Параметр	Оптичні волокна	Мідні проводи
Передача на великі відстані	Менші втрати при передачі дозволяють зменшити кількість ретрансляторів	Більші втрати сигналу, потребують часті підсилення
Інформаційна ємність	Ширша смуга пропускання, можливість передачі більшої кількості даних	Обмежена пропускна спроможність
Розміри і вага	Невеликі, легкі, зручні для монтажу в обмежених просторах	Важкі та громіздкі, займають більше місця
Стійкість до електричних завад	Не проводять електрику, несприйнятливі до електромагнітних завад	Сприйнятливі до індуктивного наведення та електромагнітних завад
Безпека	Вища експлуатаційна безпека, відсутність іскрових ефектів	Потребують заземлення, можуть бути небезпечними при високих напругах
Безпека сигналу	Високий ступінь захисту даних, оптичний сигнал не може бути легко перехоплений	Сигнали можуть бути легко перехоплені
Стійкість до корозії	Не підлягають корозії та впливу вологи	Схильні до корозії, особливо в агресивних середовищах
Служба надійності	Довший термін служби, менше необхідності в обслуговуванні	Потребують частішого обслуговування та заміни
Вартість	Вищі початкові витрати на встановлення, але нижчі витрати на обслуговування	Низькі початкові витрати, але високі витрати на обслуговування

Ця таблиця підкреслює ключові переваги оптичних волокон порівняно з мідними лініями, що робить їх більш привабливими для багатьох застосувань, особливо в умовах сучасних вимог до швидкості, безпеки та надійності передачі даних [11].

1.2 Діапазони оптичних довжин хвиль

Оптичні довжини хвиль, які використовуються в телекомунікаційних мережах, зазвичай поділяються на кілька ключових діапазонів. Наведемо основні з них в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Аналіз застосування діапазонів оптичних довжин хвиль

Діапазон	Довжини хвиль (нм)	Опис
Ультрафіолетовий (UV)	< 400	Використовується в наукових дослідженнях та спеціалізованих технологіях.
Видиме світло	400–700	Чутливий діапазон для людського ока; використовується у багатьох оптичних пристроях.
Інфрачервоний (IR)	700–1000	Застосовується в оптичних комунікаціях, теплових зображеннях, дистанційному управлінні.
Ближній інфрачервоний	700–1400	Використовується в оптоволоконних системах зв'язку.
Середній інфрачервоний	1400–3000	Застосовується в сенсорах і промислових вимірюваннях.
Далекий інфрачервоний	> 3000	Використовується в наукових дослідженнях, медицині, а також в особливих промислових застосуваннях.

Для оптоволоконних систем найбільш важливі такі діапазони (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Аналіз робочих діапазонів ВОЛЗ

Діапазон	Довжини хвиль (нм)	Опис
850 нм	800–900	Використовується для коротких дистанцій (до 500 м) в multimode волокнах.
1310 нм	1260–1340	Використовується для середніх дистанцій (до 10 км) в single-mode волокнах.
1550 нм	1530–1565	Найбільш використовуваний діапазон для довгих дистанцій (до 100 км і більше) в single-mode волокнах, з найменшими втратами.

Ці діапазони є критично важливими для розуміння оптичних комунікацій та вибору відповідних компонентів для систем зв'язку [12].

Спектр електромагнітної енергії охоплює широкий діапазон хвильових довжин і частот, які використовуються в різних наукових, промислових і побутових застосуваннях. Наведемо основні компоненти спектра електромагнітних хвиль (табл. 1.5).

Відстань між двома послідовними максимумами або мінімумами хвилі вимірюється в метрах (м), нанометрах (нм) або пікометрах (пм). Кількість коливань хвилі за одиницю часу вимірюється в герцах (Гц). Спектр електромагнітного випромінювання має величезне значення для різних технологій і науки, дозволяючи передавати інформацію, вивчати матеріали, лікувати хвороби та багато іншого.

Таблиця 1.5 – Розподіл застосування спектра електромагнітних хвиль

Тип випромінювання	Діапазон довжин хвиль	Діапазон частот	Основні властивості та застосування
Радіохвилі	> 1 мм	< 300 ГГц	Використовуються в радіо мовленні, телебаченні, мобільних телефонах.
Мікрохвилі	1 мм–1 м	300 МГц–300 ГГц	Використовуються в мікрохвильових печах, радіолокації, зв'язку.
Інфрачервоне світло	700 нм–1 мм	300 ГГц–430 ТГц	Використовується в тепловізорах, дистанційних пультах, обігріві.
Видиме світло	380 нм–700 нм	430 ТГц–770 ТГц	Єдине випромінювання, яке сприймається людським оком.
Ультрафіолетове світло	10 нм–380 нм	770 ТГц–30 ПГц	Використовується в стерилізації, фототерапії, може бути шкідливим для шкіри.
Рентгенівські промені	0.01 нм–10 нм	30 ПГц–30 ЕГц	Використовуються в медичній діагностиці, вивченні матеріалів.
Гамма-промені	< 0.01 нм	> 30 ЕГц	Високоенергетичне випромінювання, використовується в медицині, ядерній фізиці.

Усі системи зв'язку використовують певну форму електромагнітної енергії для передачі сигналів. Спектр електромагнітного (ЕМ) випромінювання показаний на рис. 1.2. [13]

Електромагнітна енергія є комбінацією електричних і магнітних полів, що складають електромагнітний спектр. Цей спектр містить різні види випромінювання, кожен з яких займає певну частину спектра та має свої унікальні властивості. Швидкість світла в вакуумі становить приблизно $c = 3 \times 10^8$ м/с. Однак при проходженні через матеріали швидкість світла зменшується залежно від коефіцієнта заломлення (n) матеріалу. Наприклад, у кварцовому склі коефіцієнт заломлення $n \approx 1.45$, що дає швидкість світла в цьому матеріалі

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \times 10^8 \text{ м/с}}{1.45} \approx 2 \times 10^8 \text{ м/с}$$

Це важливе явище використовується в багатьох технологіях, таких як оптичні волокна для телекомунікацій, де матеріали з різними коефіцієнтами заломлення використовуються для направлення світла і мінімізації втрат. Всі типи випромінювання в електромагнітному спектрі є електромагнітними хвилями, що поширюються зі швидкістю світла у

вакуумі. Коефіцієнт заломлення (n) визначає, наскільки світло сповільнюється при проходженні через певний матеріал. У телекомунікаційних системах використовуються вдосконалені методи модуляції для підвищення спектральної ефективності та збільшення пропускної спроможності.

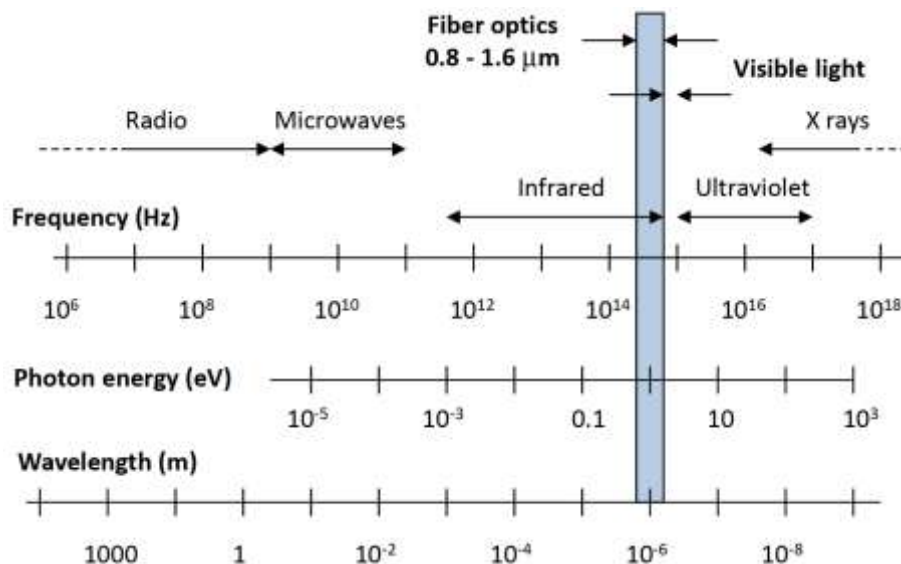


Рисунок 1.2 – Спектр електромагнітного випромінювання

Отже, завдяки розширенню і вдосконаленню таких технологій, як оптичні волокна і методи модуляції, телекомунікаційні компанії можуть забезпечувати швидкий та надійний зв'язок, задовольняючи зростаючі потреби користувачів у високошвидкісних послугах [14].

Опис фізичних властивостей хвиль у різних частинах спектра підкреслює важливість розуміння різних параметрів, які використовуються для опису електромагнітних хвиль, особливо в контексті передачі сигналів. Наведемо короткий огляд ключових аспектів, пов'язаних із цими параметрами (табл. 1.6).

Таблиця 1.6 – Основні параметри хвиль

Параметр	Опис	Використання
Довжина хвилі	Відстань між двома послідовними максимумами або мінімумами хвилі.	Визначає спектральну область для оптичного зв'язку.
Частота	Кількість коливань або циклів за одиницю часу, вимірюється в герцах (Гц).	Визначає робочий діапазон електричних сигналів.
Енергія фотона	Енергія, що переноситься фотоном, прямо пропорційна частоті й обернено пропорційна довжині хвилі.	Важливо для аналізу потужності сигналу в оптичних комунікаціях.
Оптична потужність	Загальна енергія, що передається в одиницю часу, вимірюється у ватах (Вт).	Використовується для оцінювання продуктивності оптичних компонентів.

Виконаємо аналіз залежності між параметрами.

Взаємозв'язок між частотою та довжиною хвилі можна відобразити виразом

$$c = \lambda f ,$$

де c – швидкість світла,

λ – довжина хвилі,

f – частота.

Це рівняння показує, що довжина хвилі та частота обернено пропорційні: збільшення довжини хвилі призводить до зменшення частоти, і навпаки.

Енергію фотона можна визначити за формулою

$$E = hf ,$$

де E – енергія фотона,

h – стала Планка.

Це рівняння демонструє, що енергія фотона прямо пропорційна частоті: чим вища частота, тим більша енергія фотона.

В електроніці частота зазвичай є основним параметром, оскільки вона визначає робочий діапазон таких пристроїв, як передавачі та приймачі. У волоконно-оптичних системах довжина хвилі є критично важливою для вибору оптичних компонентів (лазерів, детекторів) та для розуміння таких ефектів, як дисперсія і нелінійні ефекти. У деяких випадках, особливо у разі високих інтенсивностей сигналу, важливо враховувати оптичну частоту для аналізу таких нелінійних явищ, як самотимульоване розширення спектра або генерація гармонік. Вказані параметри та їхні взаємозв'язки допомагають інженерам і науковцям проектувати та оптимізувати системи передачі даних, забезпечуючи ефективність і надійність комунікаційних технологій [15].

Як видно з рис. 1.2, існує три різні способи вимірювання фізичних властивостей хвилі в різних областях ЕМ-спектра. Ці одиниці вимірювання пов'язані між собою простими рівняннями [15]. У вакуумі швидкість світла c дорівнює довжині хвилі λ (грецька літера лямбда), помноженій на частоту ν (грецька літера ню), так що

$$c = \lambda \nu , \tag{1.1}$$

де частота ν вимірюється в циклах за секунду або герцах (Гц).

Приклад 1.1 Дві часто задіяні в оптичному зв'язку області довжин хвиль лежать у спектральних діапазонах з центрами близько 1310 і 1550 нм. Які частоти цих двох довжин хвиль?

Розв'язання. Використовуючи $c = 2.99793 \times 10^8 \text{ м/с}$, з рівняння (1.1), відповідні частоти становлять $\nu(1310 \text{ нм}) = 228.85 \text{ ТГц}$ і $\nu(1550 \text{ нм}) = 193.41 \text{ ТГц}$.

Виконаємо автоматизоване розв'язання цього прикладу за допомогою лістингу мовою Python. Для цього наведемо текст лістингу виконуваної програми.

```
# Швидкість світла в метрах на секунду
c = 3 * 10**8
# Довжини хвиль в нанометрах
wavelengths_nm = [1310, 1550]
# Перетворення довжини хвилі з нм в метри та розрахунок частоти
for wavelength in wavelengths_nm:
    # Перетворення довжини хвилі в метри
    wavelength_m = wavelength * 10**-9
    # Розрахунок частоти
    frequency = c / wavelength_m
    # Виведення результату
    print(f'Довжина хвилі: {wavelength} нм, Частота: {frequency:.2e}
Гц")
```

В результаті виконання цієї програми отримуємо результат розв'язання завдання

Довжина хвилі: 1310 нм, Частота: 2.29e+14 Гц

Довжина хвилі: 1550 нм, Частота: 1.94e+14 Гц

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

Важливим поняттям в оптичному зв'язку є зв'язок між шириною вузької смуги хвиль $\Delta\lambda$ з центром в околі λ і відповідною їй смугою частот $\Delta\nu$. Це можна знайти, диференціюючи наведене рівняння (1.1), замінивши $\nu = c/\lambda$, що дає $\Delta\nu = c\Delta\lambda/\lambda^2$.

Зв'язок між енергією E фотона і його частотою (або довжиною хвилі) визначається рівнянням, відомим як закон Планка

$$E = h\nu = hc/\lambda, \quad (1.2)$$

де параметр

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с} = 4.14 \times 10^{-15} \text{ еВ}\cdot\text{с},$$

є сталою Планка.

Позначення Дж означає джоуль, а позначення еВ – електронний вольт, що дорівнює $1.60218 \times 10^{-19} \text{ Дж}$. Стосовно довжини хвилі (вимірюється в одиницях мкм), енергія в електрон-вольтах виражається формулою

$$E(eV) = \frac{1.2406}{\lambda(\mu m)}, \quad (1.3)$$

Приклад 1.2 Покажіть, що енергія фотонів зменшується зі збільшенням довжини хвилі. Використовуйте довжини хвиль 850, 1310 та 1550 нм.

Розв'язання. Використання рівняння (1.3) дає $E(850 \text{ нм})=1.46 \text{ eV}$, $E(1310 \text{ нм})=0.95 \text{ eV}$ і $E(1550 \text{ нм})=0.80 \text{ eV}$.

Наведемо приклад програми мовою Python, яка розраховує значення енергії фотонів в електрон-вольтах (eV) для заданих довжин хвиль 850, 1310 і 1550 нм:

```
def wavelength_to_energy(wavelength_nm):
    # Константа Планка (в Дж·с)
    h = 6.62607015e-34
    # Швидкість світла (в м/с)
    c = 3.0e8
    # Перетворення довжини хвилі з нанометрів в метри
    wavelength_m = wavelength_nm * 1e-9
    # Розрахунок енергії в Джоулях
    energy_joules = h * c / wavelength_m
    # Конвертуємо енергію в електрон-вольти (1 eV = 1.60218e-19 Дж)
    energy_ev = energy_joules / 1.60218e-19
    return energy_ev
# Довжини хвиль в нанометрах
wavelengths = [850, 1310, 1550]
# Розрахунок енергії для кожної довжини хвилі
for wavelength in wavelengths:
    energy = wavelength_to_energy(wavelength)
    print(f'Енергія фотона для довжини хвилі {wavelength} нм: {energy:.4f} eV')
```

Опис програми:

1. ****Функція `wavelength\_to\_energy`:**** Приймає довжину хвилі в нанометрах та розраховує енергію фотона в електрон-вольтах.
2. ****Константи:**** Містить константу Планка та швидкість світла.
3. ****Перетворення:**** Довжину хвилі з нанометрів перетворює в метри, а потім розраховує енергію в джоулях.
4. ****Конвертація:**** Перетворює отримане значення енергії з джоулів в електрон-вольти.
5. ****Цикл:**** Для кожної довжини хвилі з списку `wavelengths` викликає функцію та виводить результат.

В результаті виконання цієї програми отримуємо результат розв'язання завдання

Енергія фотона для довжини хвилі 850 нм – 1.4596 eV

Енергія фотона для довжини хвилі 1310 нм – 0.9471 eV

Енергія фотона для довжини хвилі 1550 нм – 0.8005 eV

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

На рисунку 1.2 показано, що оптичний спектр коливається від приблизно 5 нм (в ультрафіолетовому діапазоні) до 1 мм (для далекого інфрачервоного випромінювання). Між цими діапазонами знаходиться невидимий діапазон від 400 до 700 нм. Оптичній зв'язок використовує ближній інфрачервоний спектральний діапазон від 770 до 1675 нм.

Сектор телекомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ-Т) [16] визначив шість основних спектральних діапазонів для використання в оптичній зв'язку, які охоплюють довжини хвиль від 1260 до 1675 нм. Це діапазони:

1. О-діапазон (Original Band)**: 1260–1360 нм;
2. Е-діапазон (Extended Band)**: 1360–1460 нм;
3. S-діапазон (Short Band)**: 1460–1530 нм;
4. C-діапазон (Conventional Band)**: 1530–1565 нм;
5. L-діапазон (Long Band)**: 1565–1625 нм;
6. U-діапазон (Ultra Band)**: 1625–1675 нм.

Загасання (аттенюація) є критично важливим параметром для ефективності оптичних систем. Чим нижче загасання в оптичному волокну, тим далі можна передавати сигнал без повторного підсилення. Спектральні діапазони, визначені МСЕ-Т, враховують ділянки з мінімальним загасанням, що дозволяє забезпечити високу якість передачі даних.

Волоконний підсилювач, легований ербієм (EDFA), є важливим елементом сучасних оптичних систем, оскільки він дозволяє підсилити оптичні сигнали в цих спектральних діапазонах без перетворення їх у електричні сигнали. Це забезпечує високу ефективність і знижує витрати на обладнання та енергію.

Визначені діапазони дозволяють максимально використовувати можливості оптичних волокон і підсилювачів, знижуючи загасання та покращуючи якість сигналу. Використання цих діапазонів сприяє розширенню мереж, оскільки оператори можуть додавати нові канали без значних змін в інфраструктурі. Визначені діапазони забезпечують сумісність між різними виробниками обладнання, що спрощує інтеграцію нових технологій у вже існуючі системи. Вказані фактори роблять спектральні діапазони, визначені МСЕ-Т, критично важливими для розвитку та вдосконалення оптичних комунікаційних систем. На рис. 1.3 показані діапазони, і в табл. 1.7 вказано походження їх позначень, які відомі під літерами O, E, S, C, L та U.

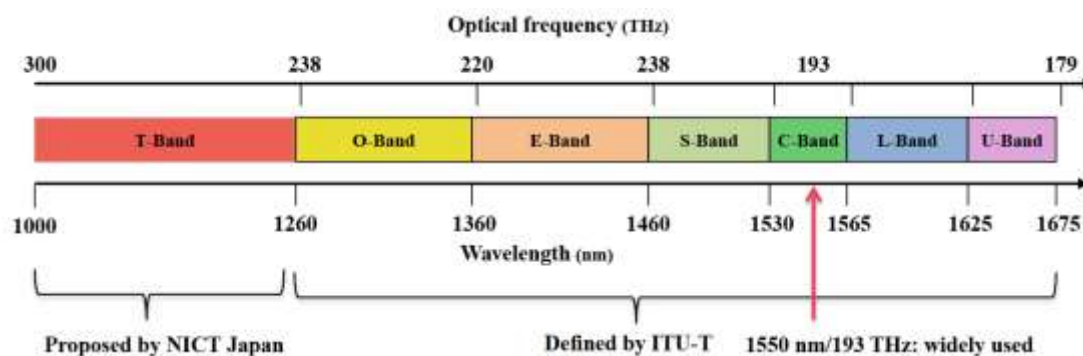


Рисунок 1.3 – Позначення спектральних діапазонів, що використовуються для оптичного зв'язку

Таблиця 1.7 - Позначення спектральних діапазонів, що використовуються в оптичному зв'язку

Name	Designation	Spectrum (nm)	Origin of name
Thousand band	T-band	1000–1260	Thousands of potential additional transmission channels
Original band	O-band	1260–1360	Original region used for single-mode fiber links
Extended band	E-band	1360–1460	Link use can extend into the region for fibers with low water content
Short band	S-band	1460–1530	Wavelengths are shorter than the C-band but higher than the E-band
Conventional band	C-band	1530–1565	Wavelength region used by EDFAs
Long band	L-band	1565–1625	Gain of an EDFA decreases steadily to 1 at 1625 nm in this band
Ultra-long band	U-band	1625–1675	Region beyond the response capability of an EDFA

Традиційно телекомунікаційні організації висловлювали зацікавленість у передачі інформації з високою пропускною спроможністю на великі відстані. У цьому контексті акцент робився на використанні спектральної області 1260–1675 нм, оскільки оптичні волокна мають низькі оптичні втрати потужності в цьому діапазоні.

У 2012 році Національний інститут інформаційно-комунікаційних технологій (NICT) Японії запропонував використовувати спектральний діапазон 1000–1260 нм, який отримав назву Т-діапазон. Тут символ «Т» розшифровується як «тисяча». Мотивацією для вивчення цього спектрального діапазону була потреба у вирішенні таких проблем: швидкозростаючої потреби в з'єднаннях на середні відстані в центрах обробки даних, розвитку Інтернету речей (IoT) і підтримки бездротових систем п'ятого покоління (5G).

Хоча загасання оптичного сигналу в стандартних телекомунікаційних волокнах вище в Т-діапазоні, порівняно з діапазонами ITU-T, втрати є

допустимими для відносно коротких відстаней передачі до декількох кілометрів, що використовуються в Т-діапазоні.

Діапазон від 770 до 910 нм використовується для більш короткохвильових багатомодових волоконних систем. Таким чином, ця область позначається як діапазон короткохвильових багатомодових волокон.

Вікна прозорості та спектральні діапазони є важливими аспектами в оптиці та телекомунікаційних системах, оскільки вони визначають, у яких діапазонах довжин хвиль світло може проходити через середовище без значних втрат. Виконаємо огляд основних вікон прозорості в оптичних системах, зокрема в оптоволоконних комунікаціях (табл. 1.8).

Таблиця 1.8 – Вікна прозорості оптичних волокон

Спектральний діапазон	Довжина хвилі (нм)	Опис	Застосування
Перше вікно	850–900	Використовується в короткохвильових системах	Стандартні оптичні волокна
Друге вікно	1300–1350	Найбільш використовуване в оптоволоконних мережах	Довгі дистанції, знижені втрати
Третє вікно	1550–1600	Оптимальне для довгих дистанцій завдяки низьким втратам	Системи з високою пропускною спроможністю
Четверте вікно	1600–1700	Використовується в спеціальних застосунках	Дослідження та експериментальні системи

Перше вікно (850–900 нм) використовується в таких короткохвильових волоконно-оптичних системах, як локальні мережі (LAN) та має вищі втрати, тому, зазвичай, прийнятне для коротких відстаней (до 300 м).

Друге вікно (1300–1350 нм) має нижчі втрати, що робить його ідеальним для середніх відстаней (до 10 км) та використовується в багатослужбових та телекомунікаційних системах.

Третє вікно (1550–1600 нм) найбільш популярне в оптоволоконних комунікаціях завдяки надзвичайно низьким втратам (менше 0,2 дБ/км) та ідеальне для міжміських та міжнародних ліній передавання.

Четверте вікно (1600–1700 нм) використовується в таких спеціальних застосунках, як дослідження і наукові експерименти, та може мати вищі втрати, ніж попередні вікна.

Вікна прозорості визначають ефективність оптоволоконних систем зв'язку. Вибір відповідного спектрального діапазону залежить від таких конкретних потреб, як відстань передачі, швидкість передачі даних та економічні аспекти [17].

На рисунку 1.4 показано робочий діапазон волоконно-оптичних систем і характеристики чотирьох ключових компонентів лінії зв'язку: оптичного волокна, джерел світла, фотоприймачів та оптичних підсилювачів. Тут пунктирні вертикальні лінії позначають центри трьох основних діапазонів робочих довжин хвиль оптоволоконних систем, а саме: короткохвильовий діапазон, О-діапазон і С-діапазон. Однією з основних характеристик оптичного волокна є його загасання як функція довжини хвилі, як показано у верхній частині на рис. 1.4.

Перші застосунки оптичних волокон у кінці 1970-х років використовували виключно діапазон довжин хвиль від 770 до 910 нм, де спостерігалася вікно з низькими втратами. У цьому діапазоні працювали оптичні джерела GaAlAs та кремнієві фотоприймачі. Цю область спочатку називали першим вікном через те, що близько 1000 нм спостерігався великий стрибок ослаблення сигналу через поглинання молекулами води. Внаслідок цього стрибка ранні волокна демонстрували локальний мінімум на кривій загасання близько 850 нм.

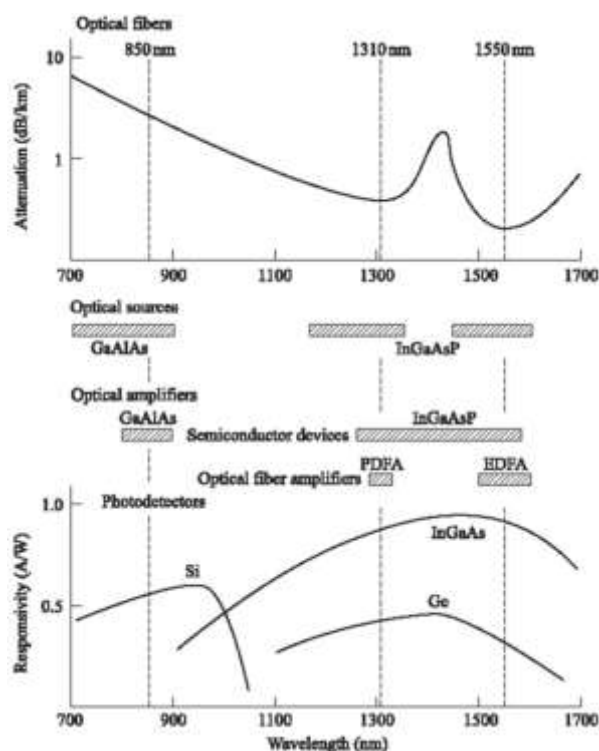


Рисунок 1.4 – Характеристики та робочі діапазони чотирьох ключових компонентів оптичних волоконно-оптичних ліній зв'язку

Зменшивши концентрацію гідроксильних іонів (OH-) та металевих домішок у матеріалі, у 1980-х роках виробники могли виготовляти оптичні волокна з дуже низькими втратами в області від 1260 до 1675 нм. Ця спектральна смуга називається довгохвильовою областю. Оскільки скло все ще містило деякі молекули води, спочатку пік поглинання залишався близько 1400 нм. Цей пік визначав два вікна з низькими втратами: друге

вікно з центром на 1310 нм і третє вікно з центром на 1550 нм. Ці два вікна тепер називаються О-діапазоном і С-діапазоном відповідно.

Бажання використовувати довгохвильові області з низькими втратами спонукало до розробки джерел світла на основі InGaAsP, фотоприймачів InGaAs і оптичних підсилювачів InGaAsP, які можуть працювати в діапазонах 1310 і 1550 нм. Крім того, легування такими рідкоземельними елементами, як Pr, Th і Er, створює оптичні волоконні підсилювачі на оптичних волокнах (які називаються, відповідно, PDFA, TDFA і EDFA). Ці пристрої, а також використання раманівського підсилення, дали подальший приріст пропускної спроможності високопродуктивних довгохвильових систем.

Спеціальні процеси очищення матеріалу дозволяють видалити майже всі молекули води зі скловолокна, що значно зменшує пік загасання на довжині хвилі близько 1400 нм. Це відкриває область пропускання в Е-діапазоні (1360–1460 нм), забезпечуючи приблизно на 100 нм більшу спектральну смугу пропускання в спеціально виготовлених волокнах, ніж у звичайних одномодових волокнах.

Системи, що працюють на довжині хвилі 1550 нм, забезпечують найнижче загасання, але дисперсія сигналу як функція відстані в стандартному кварцовому волокні більша на довжині хвилі 1550 нм, ніж на 1310 нм. Виробники подолали це обмеження, спочатку створивши волокна зі зміщеною дисперсією для роботи на одній довжині хвилі, а потім розробивши волокно з ненульовим дисперсійним зсувом (NZDSF) для використання з багатохвильовими реалізаціями. Останній тип волокна привів до широкого використання багатохвильових систем S-діапазону і C-діапазону для наземних і підводних ліній зв'язку великої пропускної спроможністю і великої протяжності.

Ці лінії зазвичай передають трафік зі швидкістю 10 Гбіт/с на відстані до 90 км між підсилювачами або ретрансляторами. До 2010 року були встановлені лінії зі швидкістю 100 Гбіт/с, а у 2017 році робоча група IEEE P802.3bs ратифікувала стандарт 400GbE (Gigabit Ethernet). Цей стандарт заклав основу для промислового розгортання 400GbE в глобальній мережі [16–18].

1.3 Відносні одиниці вимірювання рівнів оптичного сигналу

Критично важливим моментом у процесі проектування та реалізації оптоволоконної лінії зв'язку є встановлення, вимірювання та/або взаємозв'язок рівнів оптичного сигналу на кожному з елементів лінії передачі.

Таким чином, потрібно знати значення таких параметрів, як оптична вихідна потужність джерела світла, рівень потужності, потрібний на приймачі для правильного виявлення сигналу, і кількість оптичної

потужності, що втрачається на кожному зі складових елементів лінії передачі.

Зменшення або ослаблення рівня сигналу виникає через різні механізми втрат у середовищі передачі. Наприклад, електрична потужність втрачається через виділення тепла у процесі проходження електричного сигналу через струмопровідний матеріал провідників ЛЗ, а оптична потужність послаблюється через процеси розсіювання та поглинання у скляному чи пластиковому волокні або в атмосферному каналі. Для компенсування цих втрат енергії, періодично використовуються підсилювачі вздовж траси каналу для підвищення рівня сигналу, як показано на рис. 1.5.

Стандартним методом вимірювання загасання в лінії зв'язку є порівняння рівня вихідного сигналу з рівнем вхідного. Вимірювання в децибелах (дБ) є дуже зручним способом подання цих значень, оскільки дозволяє спростити обчислення і аналіз. Загасання (або втрати) в оптоволоконній лінії визначається як різниця між потужністю вихідного сигналу (P_{out}) і потужністю вхідного сигналу (P_{in}). Загасання в децибелах можна обчислити за формулою

$$A = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \text{ dB} ,$$

яка дозволяє легко порівнювати втрати на різних ділянках траси.

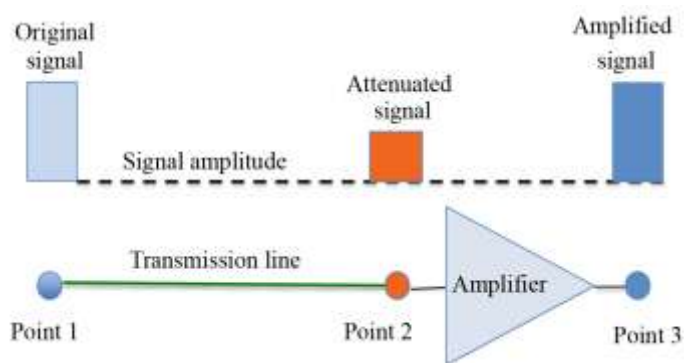


Рисунок 1.5 – Періодично розміщені підсилювачі компенсують втрати енергії в ЛЗ

В оптичних волокнах загасання сигналу зазвичай має експоненціальний характер. Це означає, що рівень сигналу спадає з відстанню, і це спостерігається внаслідок поглинання та розсіювання. Формально це можна описати рівнянням, що показує, як потужність сигналу зменшується з відстанню

$$P(z) = P_0 e^{-\alpha z} ,$$

де $P(z)$ – потужність сигналу на відстані z ,

P_0 – початкова потужність,

α – коефіцієнт загасання (вимірюється в дБ/км).

Використання логарифмічної шкали (дБ) дозволяє зручно працювати з великими діапазонами значень потужності. Додатково, дБ є адитивною одиницею, що спрощує обчислення, особливо коли потрібно скласти втрати на різних ділянках або компонентах системи. Отже, вимірювання загасання в оптоволоконних системах за допомогою логарифмічного відношення потужності в децибелах є стандартною практикою, що дозволяє легко оцінити ефективність передачі сигналу та ідентифікувати потенційні проблеми у системі. Це також полегшує проектування та оптимізацію оптоволоконних мереж [18].

Одиниця виміру дБ визначається за формулою

$$\text{Power ratio in dB} = 10 \log \frac{P_2}{P_1}, \quad (1.4)$$

де P_1 і P_2 – рівні електричної або оптичної потужності сигналу в точках 1 та 2 на рис. 1.6, а $\log$ – логарифм з основою 10.

Логарифмічна природа децибела дозволяє досить просто виражати великі співвідношення. Рівні потужності, що відрізняються на багато порядків, можна легко порівнювати, коли вони виражені в децибелах. Наприклад, зменшення потужності в 1000 разів – це втрата 30 дБ, ослаблення на 50% – це втрата в 3 дБ, а 10-кратне підсилення потужності – це приріст в +10 дБ. Ще однією привабливою особливістю децибела є те, що для вимірювання змін в амплітуді сигналу, потрібно просто додати або відняти значення втрат або підсилення в децибелах в послідовності з'єднаних елементів оптичної лінії зв'язку (наприклад, оптичних волокон, розгалужувачів, розгалужувачів потужності або підсилювачів) між двома різними точками.

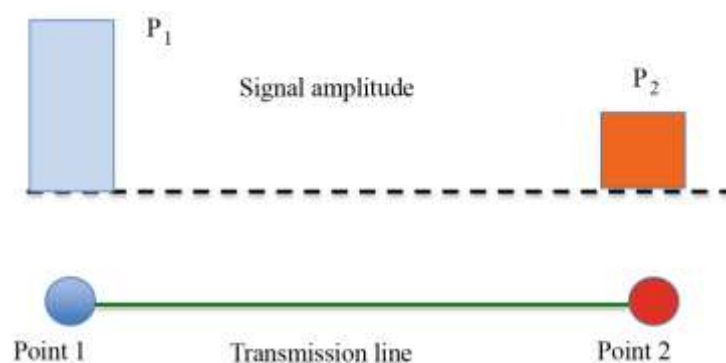


Рисунок 1.6 – Приклад загасання імпульсу в лінії зв'язку.

P_1 і P_2 – рівні потужності сигналу в точках 1 і 2

Приклад 1.3 Припустимо, що після проходження певної відстані в деякому середовищі передачі потужність сигналу зменшується вдвічі,

тобто $P_2 = 0,5P_1$ на рис. 1.6. У цей момент, використовуючи рівняння (1.4), загасання або втрата потужності становить

$$10 \log \frac{P_2}{P_1} = 10 \log \frac{0.5P_1}{P_1} = 10 \log 0.5 = 10(-0.3) = -3 \text{ dB}$$

Таким чином, -3 дБ (або ослаблення чи втрата на 3 дБ) означає, що сигнал втратив половину своєї потужності. Якщо в цій точці в лінію підключити підсилювач, щоб підсилити сигнал до початкового рівня, то цей підсилювач має коефіцієнт підсилення 3 дБ. Якщо підсилювач має коефіцієнт підсилення 6 дБ то він підвищує рівень потужності сигналу вдвічі порівняно з початковим значенням.

Приклад 1.4 Розглянемо шлях передачі від точки 1 до точки 4, показаний на рис. 1.7. Тут сигнал послаблюється на 9 дБ між точками 1 і 2. Після отримання підсилення на 14 дБ від підсилювача в точці 3, він знову послаблюється на 3 дБ між точками 3 і 4. Відносно точки 1 рівень сигналу в дБ у точці 4 становить

$$\begin{aligned} \text{dB level at point 4} &= (\text{loss in line 1}) + (\text{amplifier gain}) + (\text{loss in line 2}) \\ &= (-9\text{dB}) + (14\text{dB}) + (-3\text{dB}) = +2\text{dB} \end{aligned}$$

Таким чином, сигнал має 2 дБ (коефіцієнт $10^{0.2} = 1.58$), що відповідає збільшенню потужності при переході від точки 1 до точки 4.

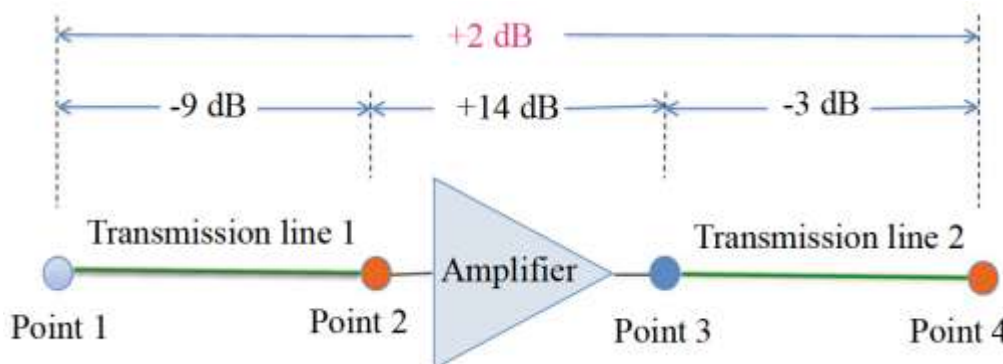


Рисунок 1.7 – Приклад ослаблення та підсилення сигналу в тракті передачі

У таблиці 1.9 наведено деякі приклади втрат потужності в децибелах і відсоток потужності, що залишився після цих втрат. Ці типи чисел є важливими при розгляді таких факторів, як наслідки відсікання невеликої частини оптичного сигналу з метою моніторингу, для дослідження втрат потужності через оптичний елемент, або при розрахунку загасання сигналу на певній довжині оптичного волокна.

Таблиця 1.9 – Репрезентативні значення втрат потужності в децибелах та решта відсотків

Power loss (in dB)	Percent of power left
0.1	98
0.5	89
1	79
2	63
3	50
6	25
10	10
20	1

Оскільки децибел використовується для позначення відношень або відносних одиниць, він не вказує на абсолютний рівень потужності. Однак для цього можна використовувати похідні одиниці. Такою одиницею, яка особливо поширена в оптоволоконному зв'язку, є дБм (просто вимовляється як де бі ем). Ця одиниця виражає рівень потужності як логарифмічне відношення до 1 мВт. У цьому випадку потужність в дБм є абсолютною величиною, яка визначається за формулою

$$\text{Power level (in dBm)} = 10 \log \frac{P(\text{in mW})}{1 \text{ mW}}. \quad (1.5)$$

Важливе емпіричне співвідношення, яке потрібно пам'ятати для оптичних волоконних комунікацій: 0 дБм = 1 мВт. Таким чином, позитивні значення dBm перевищують 1 мВт, а від'ємні значення – менші 1 мВт.

Приклад 1.5 Розглянемо три різних джерела світла з такими значеннями оптичної вихідної потужності: 0,05; 1 і 50 мВт. Які рівні потужності в одиницях дБм?

Розв'язання. Використання рівняння (1.5) для вираження рівнів оптичних сигналів в одиницях дБм показує, що вихідна потужність цих джерел становить -13 дБм; 0 дБм і +17 дБм відповідно.

Наведемо простий приклад програми мовою Python, яка визначає рівні потужності в одиницях дБм для заданих значень оптичної вихідної потужності в міліватах (мВт).

```
import math
def mw_to_dbm(mw):
    """Перетворення потужності з мВт в дБм."""
    if mw <= 0:
        raise ValueError("Потужність повинна бути більше 0 мВт")
    return 10 * math.log10(mw)
# Значення оптичної вихідної потужності в мВт
powers_mw = [0.05, 1, 50]
```

```
# Обчислення рівнів потужності в дБм
for power in powers_mw:
    try:
        power_dbm = mw_to_dbm(power)
        print(f"{power} мВт = {power_dbm:.2f} дБм")
    except ValueError as e:
        print(e)
```

Пояснення коду:

1. Імпортується модуль ``math``, щоб використовувати функцію логарифма.
2. Визначається функція ``mw_to_dbm``, яка приймає значення потужності в мВт і повертає відповідне значення в дБм.
3. Створюється список ``powers_mw``, що містить значення вихідної потужності.
4. Цикл перебирає значення з цього списку, обчислює дБм для кожного значення та виводить результат на екран.

0.05 мВт = -13.01 дБм

1 мВт = 0.00 дБм

50 мВт = 16.99 дБм

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

Приклад 1.6 Розглянемо технічний паспорт фотодетектора, в якому зазначено, що рівень оптичної потужності -32 дБм потрібний для фотоприймача, щоб задовольнити певні вимоги до продуктивності. Чому дорівнює рівень потужності в одиницях nW (нановат)?

Розв'язання. Рівняння (1.5) показує, що 32 дБм відповідає потужності в нВт

$$P = 10^{-32/10} \text{ mW} = 0.631 \text{ } \mu\text{W} = 631 \text{ nW}.$$

Наведемо приклад програми мовою Python для розрахунку значення потужності в нановатах для заданого рівня потужності в -32 дБм:

```
def dBm_to_nW(dBm):
    # Розрахунок потужності в нановатах
    nW = 10 ** (dBm / 10) * 1000
    return nW
# Заданий рівень потужності
level_dBm = -32
# Виклик функції для обчислення
power_nW = dBm_to_nW(level_dBm)
```

```
print(f"Потужність у нановатах для {level_dBm} дБм: {power_nW:.2f} nW")
```

Як результат виконання цієї програми отримуємо результат розв'язання завдання

Потужність у нановатах для -32 дБм: 0.63 nW

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

У таблиці 1.10 наведені деякі приклади рівнів оптичної потужності та їхні еквіваленти в дБм.

Таблиця 1.10 – Приклади рівнів оптичної потужності та їхні дБм-еквіваленти

Power	dBm equivalent
200mW	23
100mW	20
10 mW	10
1mW	0
100 nW	-10
10 nW	-20
1 nW	-30
100 pW	-40
10 pW	-50
1 pW	-60
100 pW	-70
10 pW	-80
1 pW	-90

1.4 Технології цифрового мультиплексування

Електричне цифрове мультиплексування є ключовою технологією в телекомунікаціях, яка дозволяє ефективно використовувати існуючі фізичні канали передачі для підтримки високошвидкісних послуг. Існує кілька поширених методів електричного цифрового мультиплексування сигналів:

У разі часового мультиплексування (TDM – Time Division Multiplexing) інформаційні потоки поділяються за часом. Кожен потік отримує свою частину часу (часовий слот) для передачі даних. Це дозволяє кільком сигналам ділити один і той же канал, не заважаючи один одному. Перевагою TDM є простота реалізації та висока ефективність використання каналу. Разом з тим, може виникати затримка в передачі, особливо при високому навантаженні.

У процесі частотного мультиплексування (FDM – Frequency Division Multiplexing) різні інформаційні потоки передаються на різних частотах у межах одного каналу. Кожен сигнал модулюється на своїй частоті, що

дозволяє одночасно передавати кілька сигналів. Перевагою є паралельна передача без затримок. Разом з тим, потребує більш складного фільтраційного обладнання і може бути підданий завадам між частотами.

У разі мультиплексування з кодовим розділенням (CDM – Code Division Multiplexing) кожен користувач отримує унікальний код, за допомогою якого його сигнал модулюється. Всі сигнали передаються одночасно, і на приймачі вони диференціюються за кодами. Перевагою є висока стійкість до завад і можливість підтримки великої кількості користувачів. До недоліків відносять складність реалізації та потреба в потужному станційному телекомунікаційному обладнанні.

Мультиплексування з частотно-часовим поділом (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing) поєднує елементи FDM та TDM, використовуючи множину ортогональних частот для передачі даних. Кожна частота передає дані у своїх часових слотах, що дозволяє зменшити вплив інтерференції. Перевагою є висока ефективність у використанні спектра та стійкість до багатопляхового розповсюдження. Недоліком є складність синхронізації та обробки сигналів.

У разі мультиплексування з просторовим поділом (SDM – Space Division Multiplexing) використовуються різні фізичні канали (наприклад, різні волокна або різні шляхи в радіочастотному спектрі) для передачі різних інформаційних потоків одночасно. Перевагами є збільшення пропускної спроможності та зменшення втрат. Разом з тим, потребує більше фізичних ресурсів.

Розглянуті методи мультиплексування дозволяють телекомунікаційним компаніям ефективно масштабувати свої мережі та задовольняти зростаючий попит на швидкісні послуги, забезпечуючи при цьому якість і надійність передачі даних [19].

1.4.1 Базове мультиплексування телекомунікаційних сигналів

Базове мультиплексування, яке часто використовується в телекомунікаціях та передачі даних, має кілька переваг. Мультиплексування дозволяє кільком сигналам або потокам даних використовувати одну фізичну лінію зв'язку, що підвищує ефективність використання доступних ресурсів. Завдяки мультиплексуванню зменшується потреба у кількох фізичних каналах для передачі даних. Це може привести до зниження витрат на обладнання та інфраструктуру. Мультиплексування дозволяє легко налаштовувати системи для підтримки таких різних типів трафіку, як голос, дані та відео, що робить мережі більш універсальними. Застосування мультиплексувань-ня може привести до збільшення загальної пропускної спроможності системи, оскільки декілька каналів даних можуть передаватися одночасно. Мультиплексування допомагає зменшити затримки та підвищити надійність передачі даних, оскільки різні потоки можуть бути адаптовані до умов мережі. Мультиплексування дозволяє зменшити кількість потрібних кабелів і з'єднань, що спрощує фізичну інфраструктуру мережі. У разі відмови

одного каналу, інші канали можуть продовжувати працювати, що підвищує загальну надійність системи. Існує кілька методів мультиплексування (таких як TDM, FDM, WDM), що дозволяє підібрати оптимальний варіант для конкретного випадку використання. Таким чином, базове мультиплексування є важливим інструментом у сучасних системах зв'язку, що забезпечує ефективну, надійну та економічну передачу інформації. У таблиці 1.11 наведено приклади швидкодії при передачі інформації для деяких типових телекомунікаційних послуг.

Таблиця 1.11 – Приклади швидкодії доступу для деяких типових послуг

Type of service	Data rate
Video on demand/interactive video	1.5–6 Mb/s
Video games	1–2 Mb/s
Remote education	1.5–3 Mb/s
Electronic shopping	1.5–6 Mb/s
Data transfer or telecommuting	1–3 Mb/s
Video conferencing	0.384–2 Mb/s
Voice (single phone channel)	33.6–56 kb/s

Мультиплексування з часовим поділом каналів (TDM) є важливою технологією в телекомунікаціях, яка дозволяє ефективно використовувати доступні ресурси зв'язку, об'єднуючи сигнали від кількох користувачів в один загальний канал передачі. Наведемо кілька ключових аспектів методу TDM та його застосування: У TDM кожному незалежному інформаційному потоку (каналу) надається певний часовий слот у рамках загального каналу. Кожен користувач отримує свою частину часу для передачі даних, що дозволяє уникнути завад і забезпечити організовану передачу сигналів. Водночас, важливо, щоб усі користувачі були синхронізовані з системою, щоб їхні сигнали не накладалися один на одного. Це досягається за допомогою спеціальних схем синхронізації, які визначають, коли кожен користувач може передавати дані. N незалежних сигналів, кожен з швидкістю R біт/с, об'єднуються в один сигнал, що передається зі швидкістю $N \times R$ біт/с. Це дозволяє значно підвищити ефективність використання каналів зв'язку.

При статичній схемі TDM кожному каналу виділяється фіксований часовий слот. Це може бути ефективним для систем, де кількість користувачів і їхні вимоги до пропускної спроможності стабільні.

У випадку динамічного TDM часові слоти можуть бути адаптивно виділені залежно від потреб користувачів. Це дозволяє більш ефективно використовувати ресурси, особливо в умовах змінюваного навантаження.

Отже, технологія TDM дозволяє максимізувати використання каналу, оскільки кілька користувачів можуть ділити один і той же канал без необхідності мати окремі лінії зв'язку. Завдяки впровадженім часовим слотам, TDM зменшує ймовірність завад між різними сигналами, що покращує якість передачі. TDM є відносно простим у реалізації і може бути інтегровано в існуючі системи зв'язку без значних змін. TDM широко використовується в таких різноманітних телекомунікаційних системах, як:

- цифрові телефонні системи для об'єднання голосових дзвінків;
- системи передачі даних для об'єднання даних від різних пристроїв в одну лінію зв'язку;
- телекомунікаційні мережі, де потрібно ефективно управляти великими обсягами трафіку.

Мультиплексування з часовим поділом каналів (TDM) є ключовим методом у телекомунікаціях, що дозволяє ефективно використовувати пропускну спроможність каналів зв'язку, забезпечуючи передачу даних від багатьох користувачів через один спільний канал. Знання про TDM та його варіації допомагає зрозуміти основи сучасних телекомунікаційних систем [20].

Перші застосунки волоконно-оптичних ліній зв'язку були, в основному, для телефонних ліній великої пропускну спроможності. Ці цифрові лінії склалися з мультиплексованих з часовим поділом каналів зі швидкістю 64 кбіт/с голосових каналів. Мультиплексування було розроблене в 1960-х роках і базується на так званій технології, що відома як плезіохронна цифрова ієрархія (PDH). На рисунку 1.8 показано цифрові ієрархії передачі, що використовуються в північно-американських та європейських телефонних мережах Північної Америки та Європи.

Фундаментальним будівельним блоком у північно-американській мережі є швидкість передачі 1,544 Мбіт/с, що відома як швидкість DS1, де DS означає цифрова система, яка утворена мультиплексуванням з часовим поділом двадцяти чотирьох голосових каналів, кожен з яких оцифрований зі швидкістю 64 кбіт/с (яка називається DS₀).

Біти, які вказують, де починається і де закінчується інформаційна одиниця, додаються разом з цими голосовими каналами, для формування бітового потоку зі швидкістю 1,544 Мбіт/с. Біти кадрування та інші контрольні біти, які можуть додаватися до інформаційної одиниці в цифровому потоці, називаються накладними бітами. При будь-якому рівні мультиплексування сигнал з визначеною вхідною швидкістю поєднується з іншими вхідними сигналами з тією ж швидкістю.

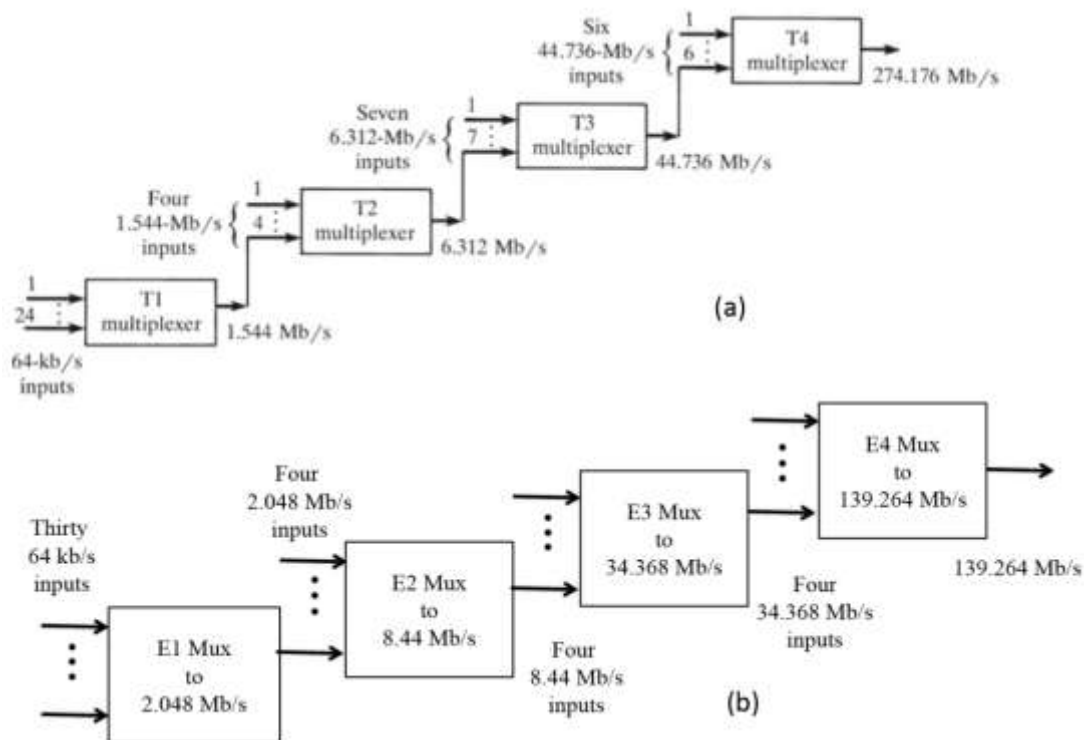


Рисунок 1.8 – Цифрові ієрархії передачі, що використовуються в телефонних мережах (а) Північної Америки та (б) Європи

При описі швидкості передачі даних у північно-американських телефонних мережах можна зустріти такі терміни, як T1, T3 і т. д. Часто терміни T_x і DS_x (наприклад, T1 і DS1 або T3 і DS3) використовуються як взаємозамінні. Однак існує тонка різниця в їхньому значенні.

Такі позначення, як DS1, DS2 і DS3 відносять до типу послуги; наприклад, користувач, який хоче надсилати інформацію зі швидкістю 1,544 Мбіт/с, підписується на послугу DS1. Такі скорочення, як T1, T2 і T3, означають швидкість передачі даних, яку використовує технологія передачі для надання цієї послуги через фізичне з'єднання. Наприклад, послуга DS1 передається по електричному каналу або оптичному волокну за допомогою електричних або оптичних імпульсів, що передаються зі швидкістю T1 = 1,544 Мбіт/с.

Телефонні мережі в інших країнах використовують європейську або японську ієрархії мультиплексування. Подібно до північно-американських ієрархій, базові канали зі швидкістю 64 кбіт/с об'єднуються, але з різними рівнями мультиплексованої швидкості, як показано в таблиці 1.12. Більшість країн за межами Північної Америки та Японії (наприклад, в Європі, Південній та Центральній Америці, Африці, Австралії та більшості країн Азії) використовує європейську ієрархію мультиплексування, позначену E1, E2, E3 і так далі [21].

Таблиця 1.12 – Рівні цифрового мультиплексування, що використовуються в Північній Америці, Європі та Японії

Multiplexing level	Number of 64 kb/s channels	Bit rate (Mb/s)		
		North America	Europe	Japan
DS0	1	0.064	0.064	0.064
DS1	24	1.544		1.544
E1	30		2.048	
	48	3.152		3.152
DS2	96	6.312		6.312
E2	120		8.448	
E3	480		34.368	32.064
DS3	672	44.736		
	1344	91.053		
	1440			97.728
E4	1920		139.264	
DS4	4032	274.176		
	5760			397.200

На рисунку 1.8, б показано кількість каналів, що мультиплексуються на кожному рівні бітрейту до E4. Наприклад, мультиплексування тридцяти каналів зі швидкістю 64 кбіт/с і додавання необхідних накладних бітів формує 2,048 Мбіт/с на рівні E1.

Схема TDM не обмежується мультиплексуванням голосових сигналів. Наприклад, на рівні DS1 або E1 будь-який цифровий сигнал відповідного формату зі швидкістю 64 кбіт/с може передаватися як один з 24 або 30 вхідних каналів, показаних на рис.1.8. Як зазначено в таблиці 1.12, основні швидкості мультиплексування для північно-американських застосувань позначені як DS1 (1,544 Мбіт/с), DS2 (6,312 Мбіт/с) і DS3 (44,736 Мбіт/с).

Приклад 1.7 Як видно з рис. 1.8, на кожному рівні мультиплексування додаються накладні біти з метою синхронізації. Яка величина накладних витрат для T1?

Розв'язання. На рівні T1 накладні витрати складають 1544 кбіт/с– 24×64 кбіт/с = 8 кбіт/с.

Для розрахунку значення швидкодії службових сигналів для T1 (також відомого як DS1) можна використовувати Python. T1 є цифровим зв'язковим стандартом, який передає дані на швидкості 1.544 Мбіт/с. Він складається з 24 каналів, кожен із яких може передавати 64 кбіт/с. Службові сигнали T1, такі як сигналізація та контроль, займають частину цього каналу. Основна мета програми — розрахувати швидкодію службових сигналів на основі вхідних параметрів.

Наведемо приклад програми, яка може розрахувати швидкодію службових сигналів для T1:

```
def calculate_t1_overhead(total_bitrate, channel_bitrate, num_channels):
    # Розрахунок загальної швидкості даних
```

```

data_capacity = channel_bitrate * num_channels
# Розрахунок швидкості службових сигналів
overhead = total_bitrate - data_capacity
# Розрахунок відсотка службових сигналів
overhead_percentage = (overhead / total_bitrate) * 100
return overhead, overhead_percentage
def main():
    # Визначення параметрів T1
    total_bitrate = 1.544e6 # Загальна швидкість T1 в біт/с
    channel_bitrate = 64e3 # Швидкість одного каналу в біт/с
    num_channels = 24 # Кількість каналів в T1
    # Розрахунок швидкодії службових сигналів
    overhead, overhead_percentage = calculate_t1_overhead(total_bitrate,
channel_bitrate, num_channels)
    print(f'Швидкість службових сигналів: {overhead} біт/с')
    print(f'Відсоток службових сигналів: {overhead_percentage:.2f}%")
if __name__ == "__main__":
    main()

```

Пояснення коду:

1. Функція ``calculate_t1_overhead``**:
 - Приймає загальну швидкість T1, швидкість одного каналу та кількість каналів.
 - Розраховує загальну доступну швидкість для даних (всі канали).
 - Розраховує швидкість службових сигналів як різницю між загальною швидкістю та доступною швидкістю для даних.
 - Повертає значення швидкості службових сигналів та відсоток.
2. Функція ``main``**:
 - Визначає параметри T1.
 - Викликає функцію для розрахунку швидкості службових сигналів.
 - Виводить результати на екран.

Запустивши цю програму, отримуємо швидкість службових сигналів для T1, а також їх відсоток від загальної швидкості.

Швидкість службових сигналів: 8000.0 біт/с

Відсоток службових сигналів: 0.52%

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

1.4.2 Ієрархія мультиплексування в SONET/SDH

З появою волоконно-оптичних ліній передачі в 1980-х роках, з'явилися нові стандарти для високошвидкісної передачі даних. У Північній Америці цей стандарт отримав назву синхронна оптична мережа (SONET), тоді як в інших частинах світу він відомий як синхронна цифрова ієрархія (SDH). Ці стандарти забезпечують структуру кадрів для передачі мультиплексованого цифрового трафіку по оптоволоконних магістралях.

Основним елементом SONET є синхронний транспортний сигнал рівня 1 (STS-1), що має швидкість передачі 51,84 Мбіт/с. Для отримання більш високошвидкісних сигналів SONET, N кадрів STS-1 об'єднуються шляхом байтового чергування. Цей процес дозволяє створити сигнали оптичної несучої, які називаються рівнями OC-N, де швидкість передачі сигналу OC-N в N разів перевищує швидкість OC-1.

У системах SDH основним будівельним блоком є синхронний транспортний модуль рівня 1 (STM-1), що має швидкість 155,52 Мбіт/с. Подібно до SONET, у SDH високошвидкісні інформаційні потоки формуються шляхом синхронного мультимплексування N різних сигналів STM-1 для створення сигналу STM-N. Ці стандарти дозволяють ефективно передавати великі обсяги даних через оптичні мережі, забезпечуючи високу швидкість і надійність з'єднань.

Ієрархія мультимплексування в SONET (Synchronous Optical Network) та SDH (Synchronous Digital Hierarchy) є структурою, що дозволяє об'єднувати кілька потоків даних (каналів) в один оптичний сигнал. Це важливо для ефективної передачі даних через оптоволоконні мережі. Нижче наведено табличний аналіз ієрархії мультимплексування в SONET/SDH.

Таблиця 1.13 – Аналіз ієрархії мультимплексування в SONET/SDH

Рівень	SONET (OC-N)	SDH (STM-N)	Пропускна спроможність	Використання
Основний рівень	OC-1	STM-1	51.84 Мбіт/с	Базовий рівень, використовується для основних передач.
Другий рівень	OC-3	STM-3	155.52 Мбіт/с	Використовується для передачі відео та голосу.
Третій рівень	OC-12	STM-12	622.08 Мбіт/с	Прийнятний для великих даних, таких як Інтернет-трафік.
Четвертий рівень	OC-24	STM-24	1.244 Гбіт/с	Використовується для широкосмугових послуг.
П'ятий рівень	OC-48	STM-48	2.488 Гбіт/с	Застосовується в магістральних мережах.
Шостий рівень	OC-192	STM-192	9.953 Гбіт/с	Прийнятний для великих дата-центрів та операторів зв'язку.
Сьомий рівень	OC-768	STM-768	39.813 Гбіт/с	Використовується в національних та міжнародних мережах.
Восьмий рівень	OC-3072	STM-3072	159.25 Гбіт/с	Найвищий рівень, використовується для спеціалізованих застосунків.

Найвищий рівень, використовується для спеціалізованих застосунків. Технологія SONET/SDH забезпечує синхронізацію на всіх рівнях, що дозволяє точно передавати дані без затримок. Дозволяє об'єднувати різні типи даних (голос, відео, дані) в один потік. Забезпечує можливість динамічного перерозподілу смуги пропускання залежно від потреб.

Формує підтримку таких різноманітних послуг, як TDM (Time Division Multiplexing), ATM (Asynchronous Transfer Mode), та Ethernet. Таким чином, ієрархія мультиплексування в SONET/SDH забезпечує ефективну та надійну передачу даних у сучасних оптоволоконних мережах [22]. У таблиці 1.14 показані часто використовувані рівні сигналів SDH і SONET, лінійну швидкість і числове позначення цієї швидкості.

Таблиця 1.14 – Порівняльний аналіз технологій SDH та SONET

SONET level	Electrical level	SDH level	Line rate (Mb/s)	Popular rate name
OC-1	STS-1	-	51.84	-
OC-3	STS-3	STM-1	155.52	155 Mb/s
OC-12	STS-12	STM-4	622.08	622 Mb/s
OC-48	STS-48	STM-16	2488.32	2.5 Gb/s
OC-192	STS-192	STM-64	9953.28	10 Gb/s
OC-768	STS-768	STM-256	39,813.12	40 Gb/s

SONET (синхронна оптична мережа) та SDH (синхронна цифрова ієрархія) мають багато спільного, оскільки SDH була розроблена на основі концепцій SONET. Однак існують певні переваги SONET у контексті конкретних застосунків, які можна виділити. SONET є основним стандартом для оптичних мереж у Північній Америці, що робить його переважним у регіонах, де цей стандарт широко впроваджений. Оскільки SONET був першим стандартом, багато старих мереж та пристроїв були спроектовані саме під SONET, що може забезпечити легшу інтеграцію нових технологій у вже існуючі системи. SONET дозволяє більш гнучке мультиплексування, що може бути корисним для певних типів трафіку та специфічних застосунків. SONET має більше різноманіття рівнів швидкості сигналів, що може бути вигідним для мереж, які потребують специфічних швидкостей передачі даних. SONET може краще підтримувати певні протоколи, які є популярними в Північній Америці, завдяки своїй специфікації та архітектурі. Однак важливо зазначити, що SDH переважає SONET у багатьох аспектах, особливо на міжнародному рівні, оскільки він є більш універсальним і може краще інтегруватися з різними типами мереж і технологій. У результаті, вибір між SONET і SDH часто залежить від специфічних вимог проекту і регіону впровадження.

1.4.3 Оптична транспортна мережа (OTN)

Оптична транспортна мережа (OTN), також відома як «оптична мережа нового покоління» або «оптична транспортна мережа», є технологією, що забезпечує ефективну та надійну передачу даних через оптичні волокна. OTN розроблена для покращення управління, безпеки та продуктивності в оптичних мережах. Наведемо ключові характеристики та переваги OTN. OTN використовує механізми синхронізації для ефективного мультиплексування різних типів трафіку (таких як Ethernet, IP, ATM) в один оптичний потік. Це дозволяє зменшити витрати на

передачу даних і збільшити ефективність використання оптичних ресурсів. OTN підтримує високу пропускну спроможність, що дозволяє передавати великі обсяги даних на великі відстані без значних втрат якості сигналу. OTN передбачає вбудовані механізми виявлення та корекції помилок, що підвищує надійність передачі даних. Це особливо важливо для критично важливих застосунків, де втрата даних є неприйнятною. OTN підтримує різноманітні типи трафіку та може адаптуватися до змін у запитах на пропускну спроможність. Це робить її придатною для використання в різних мережних середовищах. OTN може інтегруватися з існуючими мережними технологіями та стандартами, такими як SONET/SDH, Ethernet, IP, що забезпечує безперервність і зворотну сумісність. OTN дозволяє зменшити затримки при передачі даних завдяки ефективному управлінню маршрутами та оптимізації трафіку. OTN пропонує можливості масштабування, що дозволяє операторам мереж легко розширювати свої мережі відповідно до зростаючих потреб у пропускій спроможності. В цілому, OTN є потужним рішенням для сучасних вимог до передачі даних, забезпечуючи високу продуктивність, надійність і гнучкість в оптичних мережах [23].

На початку розвитку телекомунікацій основний трафік мережі складався з голосових дзвінків, які передавалися через мережі з чітко визначеними схемами з'єднань. З появою послуг передачі даних виникла потреба адаптувати існуючі мережі SONET/SDH для обробки нових типів трафіку, що охоплювало дані, відео та інші мультимедійні послуги. Хоча такі адаптації були успішними на початкових етапах, з розвитком технологій і збільшенням обсягу трафіку, ця модель стала менш ефективною, особливо при швидкостях понад 40 Гбіт/с.

Різниця між вимогами до передачі телефонії та даних ускладнила реалізацію єдиної транспортної мережі. Голосовий трафік, як правило, має передбачувану схему з'єднань і стабільні вимоги до пропускну спроможності, тоді як трафік даних часто є непередбачуваним і має варіативні вимоги до передачі, що охоплює різні обсяги та швидкості. У відповідь на ці виклики телекомунікаційна галузь розробила оптичну транспортну мережу (OTN), яка була стандартизована МСЕ (Міжнародний союз електрозв'язку) під стандартом G.709. OTN забезпечує ефективний спосіб транспортування трафіку з високою пропускну спроможністю (40 Гбіт/с і вище), завдяки своїм можливостям мультиплексування, управлінню помилками та підтримці різних типів трафіку. Ключові особливості OTN охоплюють:

1. OTN здатна обробляти різні типи трафіку (голос, дані, відео) в одній мережі, що дозволяє знизити витрати на інфраструктуру;
2. Завдяки вбудованим механізмам виявлення та корекції помилок OTN забезпечує високу надійність передачі даних;

3. OTN розроблена для підтримки швидкостей передачі, що значно перевищують 40 Гбіт/с, що робить її ідеальною для сучасних вимог до з'єднань;

4. OTN має можливість інтеграції з існуючими мережними стандартами та технологіями, що дозволяє операторам плавно переходити на нові рішення.

Таким чином, OTN стала важливим етапом у розвитку телекомунікаційних технологій, забезпечуючи ефективну, надійну та масштабовану платформу для сучасних вимог до передачі даних.

1.5 Мультиплексування каналів за довжиною хвилі

Стрімкий розвиток такого споживчого обладнання, як потужні ноутбуки, планшетні комп'ютери, смартфони з підтримкою 4G і 5G, телевізори високої чіткості та консолі для 3D онлайн-ігор, призвів до значного зростання попиту на пропускну спроможність. Це, зокрема, стимулює розвиток нових технологій і методів підвищення пропускну спроможності для різноманітних додатків, таких як відео на вимогу, хмарні обчислення, онлайн-ігри, потокове передавання музики та соціальні мережі. Щоб задовольнити ці потреби, мережні провайдери активно впроваджують різноманітні технології, які дозволяють збільшити пропускну спроможність оптичних ліній зв'язку. Основні методи включають містять:

1. Технологія розділення за довжиною хвилі (WDM) дозволяє передавати кілька оптичних сигналів на різних довжинах хвиль (колір) в одному оптоволоконному кабелі. Використання WDM значно збільшує загальну пропускну спроможність мережі, оскільки один волоконний кабель може підтримувати десятки або навіть сотні каналів одночасно;

2. Технологія поляризаційного розділення забезпечує передачу даних шляхом використання різних поляризацій світла. Завдяки цьому можна подвоїти пропускну спроможність одного волокна, оскільки кожен поляризаційний стан може нести окремий інформаційний канал;

3. Метод модового розділення за модулем використовує різні моди (режими) в оптичному волокні для передачі інформації. Це дозволяє значно збільшити кількість каналів у волокні, оскільки кожен мод може передавати свій сигнал;

4. Технологія мультиплексування з просторовим розділенням (SDM) передбачає використання кількох волокон або волоконних пучків для передачі даних одночасно. SDM дозволяє підвищити загальну пропускну спроможність системи, оскільки більше інформаційних каналів можуть бути передані безпосередньо через фізичний простір. Усі ці технології відіграють важливу роль у відповіді на зростаючий попит на високу

пропускну спроможність, забезпечуючи більш ефективні та надійні рішення для сучасних комунікаційних потреб. Завдяки цим інноваціям, мережні провайдери можуть підтримувати якісний зв'язок між клієнтами та центрами комутації трафіку, забезпечуючи безперебійний доступ до послуг і додатків [24].

1.5.1 Основи WDM

Мультиплексування з поділом по довжині хвилі (Wavelength Division Multiplexing, WDM) є технологією, що дозволяє одночасно передавати кілька незалежних потоків інформації через одне оптичне волокно, використовуючи різні довжини хвиль (колір) світла. Це досягається завдяки використанню спеціальних джерел світла, таких як лазери, які генерують сигнали на різних довжинах хвиль. Основні принципи WDM:

1. Кожен потік даних модулюється на своїй власній довжині хвилі. Це дозволяє множити кількість каналів, які можуть бути передані через одне волокно;

2. Для об'єднання сигналів на різних довжинах хвиль в один оптичний пучок використовується оптичний мультиплексор (MUX). На приймальному боці, щоб розділити сигнали знову на окремі потоки, застосовується демультимплексор (DEMUX);

3. WDM дозволяє досягати дуже високих швидкостей передачі даних, оскільки кількість каналів, які можуть бути передані через одне волокно, значно збільшується. Це робить технологію WDM надзвичайно ефективною для сучасних комунікаційних мереж. CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing): використовує більші проміжки між довжинами хвиль, що дозволяє передавати менше каналів, але знижує витрати на обладнання. DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing): використовує більш щільні довжини хвиль, що дозволяє передавати велику кількість каналів на одному волокні, що робить цю технологію ідеальною для магістральних мереж;

4. WDM системи дозволяють легко додавати нові канали без значних змін в існуючій інфраструктурі, що забезпечує гнучкість у масштабуванні мережі.

Переваги WDM:

- використання одного волокна для передачі кількох каналів знижує вартість інфраструктури;

- збільшення пропускну спроможності мережі без потреби укласти нові волокна;

- завдяки паралельній передачі даних, навіть якщо один канал зазнає збоїв, інші канали продовжують працювати. Таким чином, WDM є важливою технологією в сучасних оптичних мережах, що забезпечує ефективну і масштабовану передачу даних на великі відстані. На рисунку 1.9 показана базова концепція WDM.

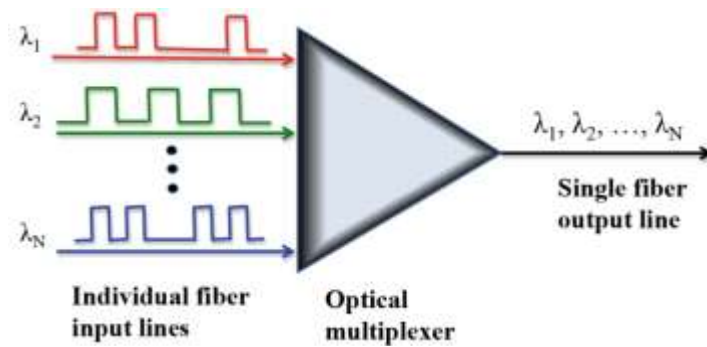


Рисунок 1.9 – Базова концепція мультиплексування з поділом по довжині хвилі

Тут N незалежних оптично відформатованих інформаційних потоків, кожен з яких передається на різній довжині хвилі, об'єднуються за допомогою оптичного мультиплексора і передаються по одному волокну.

Зверніть увагу, що кожен з цих потоків може мати різну швидкість передачі даних. Кожен інформаційний потік зберігає свою індивідуальну швидкість передачі даних після мультиплексування з іншими потоками трафіку, і все ще працює на своїй унікальній довжині хвилі. Технологія мультиплексування з поділом по довжині хвилі (WDM, Wavelength Division Multiplexing) стала важливим етапом у розвитку оптичних комунікацій. Хоча дослідження в цій галузі розпочалися ще в 1970-х роках, впровадження WDM стало можливим лише на початку 1990-х років, коли з'явилися кілька ключових факторів, які сприяли її популярності.

1. Розробка нових волокон, зокрема, низькозатратних волокон, які забезпечують кращу продуктивність при передачі на довжині хвилі 1550 нм, значно покращила можливості WDM. Ця довжина хвилі є оптимальною для передачі даних через оптичні волокна, оскільки вона має менші втрати сигналу і дозволяє досягти більших відстаней.

2. З часом з'явилися вдосконалені пристрої, які можуть ефективно об'єднувати й розділяти близько розташовані довжини хвиль. Ці пристрої, охоплюючи мультиплексори та демультимплексори, стали ключовими компонентами в системах WDM, забезпечуючи високу ефективність і надійність передачі даних.

3. Розробка таких оптичних підсилювачів, як підсилювачі на основі ербію (EDFA), дозволила значно підвищити рівень оптичного сигналу без потреби його перетворення в електричний сигнал. Це дозволяє зберігати всю обробку в оптичній області, що зменшує затримки та підвищує загальну продуктивність системи. Завдяки цим факторам WDM став популярним рішенням для збільшення пропускну здатності оптичних мереж, дозволяючи передавати одночасно кілька потоків даних через одне волокно, що суттєво підвищило ефективність використання оптичних ресурсів. Це, зі свого боку, сприяло розвитку інфраструктури інтернету та

інших комунікаційних систем, які потребують високошвидкісної передачі даних [25].

1.5.2 Мультиплексування з поляризаційним розділенням

Поляризаційне мультиплексування (PDM) є потужним методом, який дозволяє значно підвищити пропускну спроможність оптичних волокон. Наведемо кілька ключових аспектів, що підкреслюють його переваги та виклики.

1. Завдяки використанню двох ортогональних поляризаційних станів, PDM дозволяє передавати два незалежних потоки даних одночасно через одне оптичне волокно, що подвоює його пропускну спроможність.

2. PDM, в комбінації з фазовою модуляцією або квадратурною амплітудною модуляцією (QAM), дозволяє досягати швидкостей передачі даних у 100 Гбіт/с і більше.

3. PDM дозволяє оптимізувати використання наявної оптичної смуги пропускання, що знижує витрати на інфраструктуру та підвищує ефективність мережі.

Виклики впровадження PDM

1. Поляризаційно-модова дисперсія (PMD) викликана різними швидкостями, з якими сигнали з різними поляризаційними станами проходять через волокно. PMD може призводити до спотворення сигналів, що ускладнює їхнє коректне розпізнавання на приймальному боці.

2. Поляризаційно-залежні втрати (PDL) виникають, коли різні поляризаційні стани сигналів зазнають різних втрат у волокні, що може вплинути на загальну ефективність передачі даних.

3. Крос-поляризаційна модуляція (XPM) – явище, при якому один поляризаційний стан може впливати на інший, що може призводити до додаткових спотворень сигналів.

Рішення для подолання викликів

- Використання таких технологій, як поляризаційно-мультиплексна диференціальна фазова маніпуляція (PM-DQPSK), дозволяє ефективно боротися з PMD та XPM, завдяки чому забезпечується стабільніша та надійніша передача даних.

- Використання адаптивних алгоритмів для моніторингу та корекції помилок у реальному часі може допомогти зменшити вплив PMD і PDL. Загалом, PDM є важливим інструментом у сучасних оптичних комунікаційних системах, що дозволяє досягати високих швидкостей передачі даних, але вимагає уважного підходу до проектування та впровадження для подолання пов'язаних з ним викликів.

Технологія PDM (Polarization Division Multiplexing) є одним із способів підвищення швидкості передачі даних в оптичних мережах шляхом використання поляризаційної інформації. Однак для ще більшого підвищення швидкості передачі можна використовувати низку інших технологій, які добре поєднуються з PDM.

1. Технологія WDM (Wavelength Division Multiplexing) дозволяє передавати декілька оптичних сигналів одночасно по одному волокну, використовуючи різні довжини хвиль. Комбінування WDM з PDM дозволяє значно збільшити пропускну спроможність мережі.

2. Метод модуляції QAM (Quadrature Amplitude Modulation) дозволяє передавати більше бітів на символ, що підвищує загальну швидкість передачі даних. Використання QAM разом із PDM може ще більше покращити ефективність передачі.

3. Використання лазерів з розподіленим зворотним зв'язком та оптичних підсилювачів на основі ербію DFB (Distributed Feedback Laser) та EDF (Erbium-Doped Fiber Amplifier) може покращити якість сигналу і дозволити передачу на більші відстані, що є важливим для систем, які використовують PDM.

4. Технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output), яка широко використовується в бездротових системах, може бути адаптована до оптичних систем, дозволяючи одночасну передачу даних через декілька каналів або модулів, підвищуючи швидкість і надійність.

5. Технологія SDM (Space Division Multiplexing) передбачає використання декількох оптичних волокон або декількох мод у одному волокні для передачі даних. Поєднання SDM з PDM може суттєво збільшити пропускну спроможність системи.

6. Використання вдосконалених методів корекції помилок Advanced Forward Error Correction (FEC) може підвищити надійність передачі даних, дозволяючи використовувати вищі швидкості без втрати якості сигналу.

7. Використання таких оптичних технологій для обробки сигналів Optical Signal Processing, як оптичні фільтри та модулятори, може підвищити ефективність передачі даних.

8. Технологія Dynamic Bandwidth Allocation (DBA) дозволяє динамічно розподіляти пропускну спроможність між різними користувачами або потоками даних, що може оптимізувати використання ресурсів у мережі. Комбінуючи ці технології з PDM, можна суттєво підвищити швидкість передачі даних та загальну продуктивність оптичних мереж [26].

1.5.3 Просторове мультиплексування оптичних каналів

Метод просторового мультиплексування (Space Division Multiplexing, SDM) є важливим рішенням для збільшення пропускну спроможності оптичних волокон за рахунок використання волокон з декількома осердями. Наведемо кілька ключових аспектів та переваг даної технології:

1. Кожне осердя в багатоосердному волокні забезпечує окремий канал для передачі інформації. Це дозволяє здійснювати паралельну передачу даних, що значно підвищує загальну пропускну спроможність системи;

2. SDM може бути поєднано з технологією густого хвильового мультиплексування (Wavelength Division Multiplexing, WDM), що дозволяє

ще більше збільшити пропускну спроможність. У цьому випадку кожне осердя може передавати декілька оптичних сигналів на різних довжинах хвиль;

3. Використання кількох осердь в одному волокні дозволяє більш ефективно використовувати наявні оптичні ресурси, особливо в умовах зростаючого попиту на пропускну спроможність;

4. Збільшення пропускну спроможності порівняно з одноосердним. Наприклад, семиосердне волокно може забезпечити пропускну спроможність, що в сім разів перевищує пропускну спроможність одноосердного волокна, за умови, що характеристики передачі залишаються аналогічними.

5. SDM надає можливість легко масштабувати мережі, що дозволяє операторам адаптуватися до зростаючих потреб у даних.

6. Багатоосердні волокна можуть сприяти зниженню втрат сигналу, оскільки ізольовані осердя можуть мати кращі характеристики передачі та меншою ймовірністю впливу один на одного.

7. SDM відкриває нові можливості для впровадження таких майбутніх технологій, як оптичні мережі 5G та 6G, які вимагатимуть значно більшої пропускну спроможності. Загалом, метод просторового мультиплексування є потужним інструментом для подолання викликів, пов'язаних із зростаючими вимогами до пропускну спроможності в сучасних оптичних мережах.

Технології, що можуть покращити просторове мультиплексування (SDM, Space Division Multiplexing), містять різноманітні підходи до оптимізації передачі даних через оптичні мережі. Наведемо деякі з них.

1. Використання мультимодових оптичних волокон може підвищити пропускну спроможність шляхом передачі декількох модів світла одночасно, що дозволяє збільшити обсяг даних, які можуть передаватися.

2. Кільцеві топології можуть підвищити надійність та ефективність передачі даних завдяки застосуванню резервних маршрутів. Це дозволяє підтримувати зв'язок навіть у випадку відмови елементів мережі.

3. Використання таких оптичних посилювачів, як EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifiers), дозволяє підсилити сигнал без перетворення його в електричний, що підвищує дальність передачі і зменшує втрати.

4. Технології WDM, зокрема DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), дозволяють передавати дані на різних довжинах хвиль одночасно через одне оптичне волокно, що значно збільшує його пропускну спроможність.

5. Використання оптичних комутаторів може поліпшити управління трафіком і зменшити затримки, дозволяючи більш ефективно розподіляти дані між різними шляхами у мережі.

6. Використання технології MIMO (Multiple Input Multiple Output), що дозволяє використовувати декілька оптичних пучків для передачі даних.

7. Використання фотонних кристалів у волоконно-оптичних системах може покращити контроль за властивостями світла, що приводить до підвищення ефективності передачі даних.

8. Технології, що дозволяють адаптувати оптичні мережі до змін у навантаженні та в умовах, можуть оптимізувати використання ресурсів і підвищити загальну продуктивність системи.

9. Поєднання просторового мультиплексування з мультимодовими волокнами може ще більше підвищити пропускну спроможність, використовуючи переваги обидвох технологій. Вказані технології можуть значно поліпшити ефективність і продуктивність SDM, що дозволяє створити більш потужні та надійні оптичні мережі [26].

1.6 Основні елементи волоконно-оптичних систем

Основна функція оптоволоконних ліній зв'язку полягає в передачі інформації від комунікаційного обладнання (наприклад, комп'ютера, телефона або відеопристрою) в одному місці до відповідного обладнання в іншому місці на великі відстані з високою швидкістю та з мінімальними втратами сигналу. Оптоволоконні кабелі використовують світлові імпульси для передачі даних, що дозволяє їм забезпечувати більшу пропускну спроможність і швидкість передачі, ніж традиційні мідні кабелі. На рис. 1.10 показані основні складові волоконно-оптичної лінії зв'язку.

Ключовими секціями є передавач, що складається з джерела світла і пов'язаної з ним схеми живлення; кабель, що забезпечує механічний і екологічний захист оптичних волокон, які містяться всередині; і приймач, що складається з фотоприймача, а також схеми підсилення і відновлення сигналу. Додаткові компоненти містять оптичні підсилювачі, роз'єми, з'єднувачі, муфти, регенератори (для відновлення форми сигналу) та інші пасивні компоненти та активні фотонні пристрої. Оптичний кабель є критично важливим елементом сучасних систем зв'язку. Він складається з одного або декількох оптичних волокон, які забезпечують передачу даних за допомогою світла. Основні переваги використання оптичних кабелів охоплюють високу швидкість передачі даних, великий обсяг інформації, що передається, а також меншу вартість передачі на великі відстані порівняно з мідними кабелями.

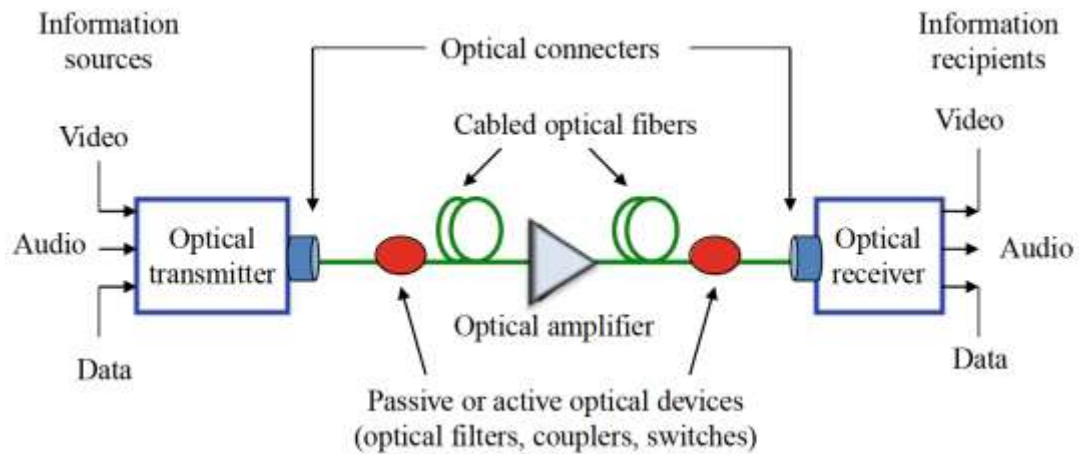


Рисунок 1.10 – Основні складові волоконно-оптичного каналу зв'язку

Коли мова йде про різні типи волокон, важливо зазначити, що існують два основні типи оптичних волокон: однорежимні (SMF) і багатосвітлові (MMF). Однорежимні волокна зазвичай використовуються для довгих дистанцій, оскільки вони мають менше загасання і дозволяють передавати сигнали на великі відстані без значних втрат. Багатосвітлові волокна більш придатні для коротших відстаней, оскільки в них можливе мультиплексування світлових пучків, але вони можуть зазнавати значних втрат сигналу на великих відстанях. Також варто згадати, що оптичні кабелі можуть мати різні конструкції та захисні матеріали, залежно від умов експлуатації, наприклад, для зовнішнього або внутрішнього монтажу, що забезпечує їхню стійкість до механічних пошкоджень, вологи та інших факторів навколишнього середовища. Таким чином, оптичні кабелі є універсальним рішенням для забезпечення високошвидкісних комунікацій у різних сферах, охоплюючи телекомунікації, промисловість, медицину та багато інших.

Для забезпечення надійної роботи оптичних волокон важливо використовувати відповідні конфігурації кабелів та якісні оптичні роз'єми і з'єднувачі. Наведемо кілька ключових моментів, які варто врахувати.

1. Для внутрішнього використання зазвичай використовують кабелі з меншою міцністю, які можуть бути легшими та гнучкішими. Важливо, щоб вони відповідали стандартам вогнестійкості. Для прокладання в землі зазвичай використовують армовані кабелі, здатні витримувати механічні навантаження та вплив вологи. Часто такі кабелі мають захист від гризунів. Кабелі, що прокладаються на стовпах, мають бути стійкими до впливу таких атмосферних умов, як волога та ультрафіолетове випромінювання. Для підводного прокладання використовують спеціалізовані кабелі з високим ступенем герметичності та захистом від корозії.

2. Використання роз'єднувачів з низькими втратами є критично важливим для зменшення втрат сигналу під час з'єднання волокон. Це

особливо важливо в системах, які потребують високої пропускної спроможності. Різні типи з'єднувачів (наприклад, SC, LC, ST) мають свої переваги і недоліки, тому вибір залежить від конкретних умов прокладання та використання. Загалом, правильний вибір кабелів та з'єднувачів визначає ефективність і надійність оптичних волоконних мереж [27].

Отже, як і стосовно мідних кабелів, прокладання оптоволоконних кабелів може бути: повітряним, в каналах, підводним або закопаним безпосередньо в землю, як показано на рис. 1.11.

Структура кабелю буде суттєво відрізнятися залежно від конкретного застосування і середовища, в якому він буде прокладений. Через обмеження, пов'язані з монтажем та/або виробництвом, індивідуальна довжина кабелю для прокладання всередині будівлі або наземних застосувань буде змінюватись від декількох сотень метрів до декількох кілометрів.

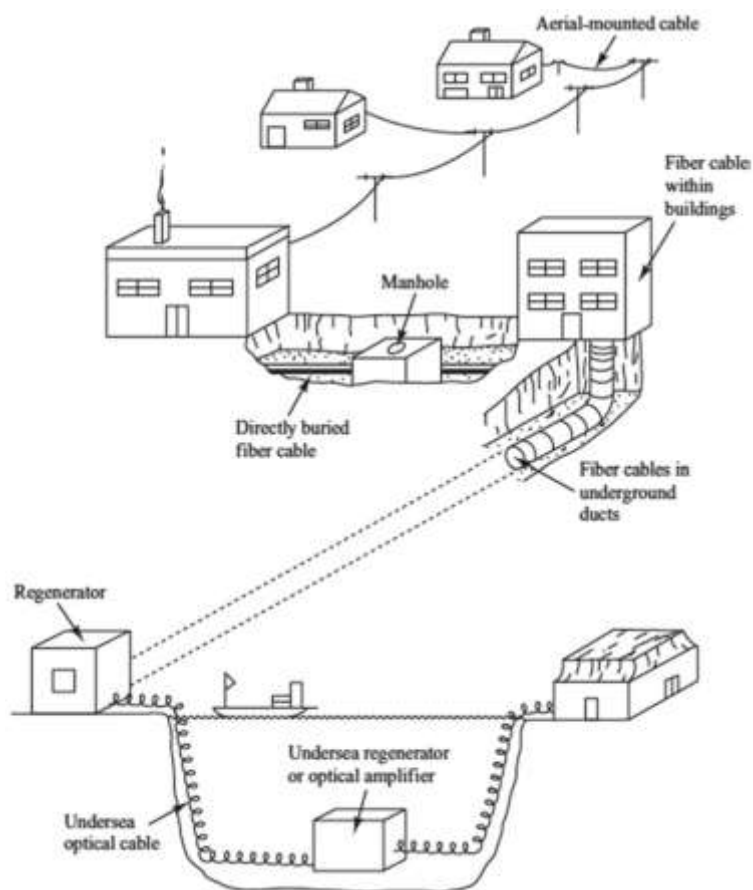


Рисунок 1.11 – Оптоволоконні кабелі можна прокладати на стовпах, в каналах, під водою або закопувати безпосередньо в землю

Практичні міркування, такі як розмір котушки та вага кабелю, суттєво впливають на вибір довжини секцій кабелю. Ці фактори важливі на всіх етапах – від виробництва та транспортування до встановлення та обслуговування. Короткі сегменти ОК використовуються переважно для прокладання в каналах чи у важкодоступних місцях, де маневрування з

довгими секціями може бути ускладнене. Короткими сегментами легше управляти, їх простіше транспортувати та встановлювати в обмежених просторах. Довгі секції більш придатні для повітряного прокладання, прямого заглиблення або підводного використання, оскільки дозволяють зменшити кількість з'єднань, що, зі свого боку, знижує ризики втрат сигналу та поломок. Внутрішні та зовнішні канали забезпечують захист для кабелів і полегшують їх обслуговування. У таких умовах часто використовують коротші відрізки. Для зовнішнього прокладання в траншеях важливо забезпечити належний захист кабелів від механічних пошкоджень і вологи. Метод прямого заглиблення вимагає спеціальних кабелів, стійких до впливу ґрунту та вологи. Кабелі, укладені в землю, потребують додаткового захисту.

Популярний метод прокладання кабелів на великих відстанях – це підвішування на стовпах, він дозволяє знизити витрати на землю. При прокладанні під водою використовуються спеціалізовані кабелі з високим ступенем герметичності, а також оптичні ретранслятори, які допомагають підтримувати якість сигналу на великих відстанях. Довжина трансокеанських кабелів дійсно може сягати тисяч кілометрів. Використання оптичних ретрансляторів на відстані 60–100 км є критично важливим для компенсації втрат сигналу, що виникають через довгі відстані. Ці ретранслятори підсилюють сигнал, забезпечуючи високу якість зв'язку між континентами. Усе це підтверджує, що проектування та реалізація оптоволоконних мереж вимагають ретельного планування, врахування специфічних умов прокладання та технологічних особливостей. При передачі оптичного сигналу через волокно виникають різні фактори, які можуть призводити до його ослаблення і спотворення. Давайте розглянемо ці аспекти детальніше. Явище розсіювання, при якому частина світла розсіюється в різних напрямках, призводить до втрат сигналу. Основним типом розсіювання в оптичних волокнах є розсіювання Релея, яке виникає через нерівності в матеріалі волокна. Явище поглинання це втрата енергії світла, що проходить через волокно, внаслідок перетворення його в тепло. Поглинання може бути спричинене домішками в склі або поглинанням на межі між волокном і навколишнім середовищем. Явище дисперсії, при якому різні частоти світла в оптичному сигналі поширюються з різними швидкостями призводить до спотворення сигналу. Існує кілька типів дисперсії, зокрема, модова дисперсія (в мультидисперсійних волокнах) і дисперсія матеріалу.

На кінці волоконно-оптичної лінії передачі розташований приймальний пристрій, який є критично важливим для інтерпретації інформації, що міститься в оптичному сигналі. Зазвичай це фотодетектор, який перетворює оптичний сигнал знову в електричний. Приймальні пристрої можуть містити різні типи фотодетекторів, такі як PIN-фотодіоди або фотодіоди Avalanche (APD), які забезпечують високу чутливість і швидкість реагування.

Для забезпечення надійності та якості зв'язку важливо регулярно моніторити стан волоконно-оптичної лінії. Це може охоплювати вимірювання потужності сигналу на виході, аналіз битих бітів і використання системи управління та моніторингу для виявлення можливих проблем. Загалом, ефективна передача оптичного сигналу вимагає врахування всіх цих факторів, щоб забезпечити високу якість зв'язку та мінімізувати втрати під час передачі даних.

Розглянемо основні елементи та функції оптичного приймача, а також фактори, які впливають на його продуктивність. Фотодіод, що використовується в приймачі, є ключовим елементом, який виявляє оптичний сигнал. Він перетворює оптичну енергію на електричний сигнал (фотострум). Кремнієві фотодіоди, що використовуються в діапазоні від 770 до 910 нм, є популярними через їх високу чутливість у цьому спектрі. Після перетворення оптичного сигналу на електричний, сигнал, зазвичай, потребує підсилення. Цей етап є критично важливим для відновлення точності сигналу, особливо коли початковий сигнал ослаблений і спотворений. Підсилювальні схеми можуть містити такі різні компоненти, як операційні підсилювачі, які покращують співвідношення сигнал/шум.

Для відновлення даних, які містяться в ослабленому сигналі, приймач має мати алгоритми для корекції помилок. Це може містити використання кодів корекції помилок, які допомагають зменшити ймовірність помилок у процесі передачі даних. Мінімальна оптична потужність – це найбільш критична характеристика, оскільки вона визначає, яка мінімальна потужність оптичного сигналу потрібна для досягнення заданої ймовірності помилки (BER) для цифрових систем або заданого співвідношення сигнал/шум (SNR) для аналогових систем. Приймач має бути спроектований так, щоб працювати на заданій швидкості передачі даних, що вимагає належних характеристик як фотодіода, так і підсилювальних компонентів.

Шум в системі може суттєво вплинути на продуктивність приймача. Існує кілька типів шуму, зокрема термічний шум, шум Джонсона та шум, що виникає від самих фотодіодів. Зменшення шуму в системі допомагає покращити співвідношення сигнал/шум, що, зі свого боку, підвищує якість отриманого сигналу. Загалом, конструкція та функціонування оптичного приймача є складними і вимагають ретельного проектування для забезпечення надійності та ефективності передачі даних через оптичні волокна. Це важливий компонент у всіх сучасних оптоволоконних комунікаційних системах.

До складу будь-якої оптоволоконної лінії зв'язку входять різні пасивні та активні оптичні пристрої, які допомагають контролювати і спрямовувати світлові сигнали. Розглянемо їх детальніше.

Пасивні оптичні компоненти

1. Оптичні фільтри відбирають світло лише з певного спектра, що дозволяє зменшити шум і покращити якість сигналу. Це особливо важливо в системах, де потрібно виділити певні довжини хвиль для передачі даних.

2. Оптичні розгалужувачі ділять потужність оптичного сигналу на декілька каналів, що дозволяє одночасно передавати дані по кількох напрямках. Вони використовуються для під'єднання кількох користувачів до однієї оптоволоконної лінії.

3. Оптичні мультиплексори об'єднують сигнали з різних джерел (додаткових довжин хвиль) в один оптичний сигнал, що проходить через одне волокно. Це дозволяє ефективно використовувати смугу пропускання волокна, зменшуючи витрати на інфраструктуру.

4. З'єднувачі використовуються для з'єднання двох волокон, а також для відбору частини світла з каналу для моніторингу та управління якістю сигналу.

Активні оптичні компоненти

1. Модулятори світлового сигналу змінюють амплітуду, частоту або фазу світлового сигналу, що дозволяє передавати інформацію. Вони можуть бути налаштовані на різні довжини хвиль, що дає змогу адаптувати систему до потреб користувачів.

2. Реконфігуровані елементи дозволяють змінювати конфігурацію оптичної мережі в реальному часі, додаючи або відкидаючи довжини хвиль на проміжних вузлах. Це забезпечує гнучкість у керуванні мережею.

3. Змінні оптичні атенюатори зменшують потужність оптичного сигналу для контролювання рівня сигналу в системі. Вони можуть бути використані для налаштування системи на оптимальний рівень роботи.

4. Оптичні перемикачі дозволяють змінювати шлях сигналу в оптичній мережі, що дає змогу перенаправляти трафік залежно від навантаження або для забезпечення резервування. Всі ці компоненти спільно забезпечують ефективну, надійну і гнучку роботу оптоволоконних мереж, що дозволяє задовольняти вимоги сучасних комунікаційних систем.

Важливість підвищення потужності сигналу в оптоволоконних системах і необхідність управління втратами, які виникають у процесі передачі, базується на ключових аспектах, що пов'язані з підсиленням оптичного сигналу та сучасними технологіями, які допомагають покращити якість зв'язку:

Бюджет потужності – це розрахунок, який враховує всі втрати сигналу на шляху від передавача до приймача. Він містить втрати через розсіювання, поглинання, з'єднання, роз'єми та інші фактори. Інженери використовують цей бюджет для визначення, чи потрібно додавати підсилювачі або повторювачі в систему, щоб забезпечити надійний зв'язок.

Оптичні підсилювачі підвищують потужність оптичного сигналу без перетворення його в електричний. Вони здатні підсилювати сигнал, не додаючи значних втрат, що особливо важливо для високошвидкісних систем.

Ретранслятори виконують функцію не лише підсилення сигналу, але й відновлення його первісної форми. Це вимагає перетворення оптичного сигналу в електричний, його підсилення, а потім – знову в оптичний. Це може призводити до затримок і додаткових витрат на обладнання. Сучасні системи намагаються мінімізувати використання ретрансляторів, оскільки вони можуть бути складнішими в реалізації і вимагати більше енергії.

Оптичні підсилювачі на основі волокон EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) є одним з найпоширеніших типів оптичних підсилювачів, що використовують волокно, леговане ербієм. Він ефективно підсилює сигнали в діапазоні довжин хвиль, що використовуються в таких FDM системах, як WDM (Wavelength Division Multiplexing). Розподілене підсилення передбачає використання ефекту вимушеного комбінаційного розсіювання (SBS) та інших методів, дозволяє здійснювати підсилення по всій довжині волокна, що робить систему більш ефективною та зменшує кількість потрібних підсилювачів.

У багатохвильових системах, де використовуються кілька довжин хвиль одночасно, важливо забезпечити, щоб кожна з них підсилювалася без спотворення або взаємодії з іншими хвилями. Це вимагає високої точності в дизайні та технології підсилювачів. У загальному, розвиток технологій оптичного підсилення та управління потужністю сигналу є критично важливим для забезпечення надійного, швидкого та ефективного зв'язку в сучасних оптоволоконних мережах.

Встановлення та експлуатація волоконно-оптичних систем зв'язку вимагають ретельного контролю та вимірювання різних параметрів. Це забезпечує належну роботу системи та її надійність. Наведемо детальний розгляд цих аспектів. Для перевірки робочих характеристик компонентів волоконно-оптичних систем використовуються різні методи та інструменти. Наприклад, оптичні потужності вимірюються за допомогою оптичних потужномірів, а втрати в розгалужувачах і з'єднувачах можуть бути перевірені за допомогою тестування за допомогою світлових джерел. Для розгалужувачів, з'єднувачів і муфт важливо вимірювати втрати вставляння та повернення. Це дозволяє оцінити ефективність їх роботи і вплив на загальні втрати системи. Для джерел світла (лазерів і світлодіодів), фотоприймачів та оптичних підсилювачів важливо перевіряти їх вихідну потужність, чутливість та лінійність. Коефіцієнт бітових помилок (BER) визначає, скільки бітів у переданих даних є помилковими. Він є критичним для оцінювання якості зв'язку. Часовий джитер – це варіація часу між послідовними сигналами. Високий рівень джитеру може призвести до спотворення сигналу. Параметр відношення сигнал/шум (SNR) важливий для визначення якості сигналу в системі. Високе відношення сигнал/шум забезпечує кращу якість зв'язку.

В процесі експлуатації системи потрібно регулярно моніювати її стан. Це охоплює:

- виявлення місць несправностей у волокнах за допомогою тестування на відстань (OTDR);
- оцінювання стану віддалених оптичних підсилювачів, щоб забезпечити їх нормальну роботу;
- моніторинг загальних втрат у системі, щоб вчасно виявляти потенційні проблеми.

Всі ці заходи допомагають забезпечити стабільність, надійність та високу якість волоконно-оптичних систем зв'язку, що є критично важливим для сучасних комунікацій.

1.7 Розвиток волоконно-оптичних мереж

Технологія оптичних мереж пройшла значний шлях з моменту своїх перших кроків у 1970-х роках. Наведемо кілька ключових моментів, які ілюструють цей розвиток. Перші системи оптичного зв'язку використовували просту модуляцію з увімкненням/вимкненням (ООК), яка є базовою формою модуляції, де інформація передається шляхом зміни стану світла (ввімкнено/вимкнено). Зі швидкістю 6,3 Мбіт/с та відстанню до 10 км, ці системи заклали основу для подальшого розвитку технологій. З часом швидкість передачі даних в оптоволоконних мережах постійно зростала. Від 10 Мбіт/с у 1980-х роках до 1 Гбіт/с у 1990-х та далі до 10 Гбіт/с, 40 Гбіт/с і навіть 100 Гбіт/с у сучасних системах. Завдяки такій технології мультиплексування, як WDM (Wavelength Division Multiplexing), стало можливим передавати кілька сигналів одночасно через одне волокно, що значно збільшило пропускну спроможність мережі. Сучасні оптичні мережі використовують такі складні методи модуляції, як QAM (Quadrature Amplitude Modulation) та OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), що дозволяє досягати високих швидкостей передачі даних і підвищити ефективність використання спектра. Оптичні ретранслятори та регенератори дозволяють подолати великі відстані, компенсуючи втрати сигналу і забезпечуючи якісний зв'язок на великих дистанціях. Сьогодні оптичні волоконні мережі є основою глобальної системи зв'язку, охоплюючи інтернет, телевізійні трансляції та телефонний зв'язок. Вони забезпечують високу швидкість, надійність і пропускну спроможність, що є критично важливими для сучасних комунікацій. Таким чином, технологія оптичних мереж значно еволюціонувала, надаючи можливість ефективно передавати великі обсяги даних на великі відстані з високою якістю.

Як показано на рис. 1.12, з того часу спостерігається постійне зростання швидкості передачі даних і відстані передачі на 40–50% на рік. Приблизно до 1995 року оптичне волокно зазвичай передавало дані на одній довжині хвилі з використанням ООК модуляції. Поступово вищі швидкості передачі даних були досягнуті головним чином завдяки розробці більш ефективного обладнання для маршрутизації та комутації

даних і використання переваг вдосконалення технології кремнієвих пристроїв для лазерних драйверів. Потім в середині 1990-х років використання мультимплексування з поділом по довжині хвилі (WDM) дозволило значно збільшити пропускну спроможність лінії зв'язку за рахунок одночасної передачі інформації на декількох довжинах хвиль окремими оптичними волокнами. Крім того, розробка і впровадження оптичних підсилювачів дозволило операторам передавати інформацію на більші відстані без проміжних ретрансляційних станцій.

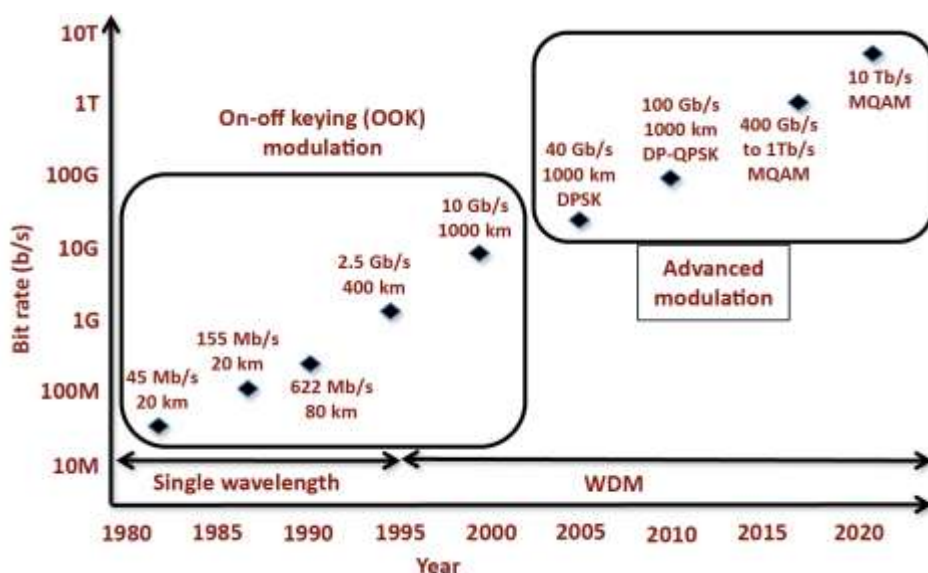


Рисунок 1.12 – Розвиток пропускної спроможності оптичних мереж зв'язку

З моменту впровадження нових технологій, телекомунікаційні компанії змогли суттєво підвищити швидкість і ефективність передачі даних. Додамо кілька деталей про кожен з етапів.

1. Метод OOK (On-Off Keying) є найпростішим у реалізації, але має обмеження щодо спектральної ефективності, оскільки передає лише два стани (ввімкнено/вимкнено).

2. Введений у 2005 році метод DPSK (Differential Phase Shift Keying) дозволяє передавати дані, використовуючи різниці у фазах сусідніх символів, що підвищує стійкість до шуму. Швидкість до 40 Гбіт/с на одну довжину хвилі стала значним досягненням для сучасних систем.

3. Запровадження методу DP-QPSK (Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying) в 2011 році дозволило використовувати дві поляризації одночасно, що подвоює пропускну спроможність каналу. Це стало великим кроком вперед, оскільки 100 Гбіт/с на одну довжину хвилі відкриває нові можливості для мереж.

4. З 2017 року використання квадратурної амплітудної модуляції вищих порядків (16QAM, 64QAM) дало змогу досягати швидкостей передачі даних від 400 Гбіт/с до 10 Тбіт/с і більше. Ці методи забезпечують

вищу спектральну ефективність, проте вимагають більш високої якості сигналу та складніших систем обробки.

5. Технології когерентного детектування та цифрової обробки сигналів (DSP) стали основою для сучасних оптичних систем, оскільки вони дозволяють компенсувати спотворення сигналу і підвищувати точність демодуляції.

6. Використання методів корекції помилок (FEC) стало важливим для зменшення вимог до співвідношення сигнал/шум, що дозволяє підвищити надійність зв'язку навіть в умовах сильного шуму. Таким чином, ці технології значно розширили можливості телекомунікаційних мереж, даючи змогу задовольнити потреби сучасного суспільства у високошвидкісному доступі до інформації.

У сучасних телекомунікаційних системах використовуються різноманітні методи модуляції, які дозволяють підвищити швидкість передачі даних, ефективність використання спектра та надійність зв'язку. Наведемо деякі з найпоширеніших методів.

1. Метод QAM (Quadrature Amplitude Modulation) комбінує амплітудну та фазову модуляції. Використовується для передачі даних в таких форматах, як 16QAM, 64QAM, 256QAM і навіть 1024QAM. Чим вищий порядок QAM, тим більше бітів передається за символ, але й вимоги до співвідношення сигнал/шум також зростають.

2. Метод OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) розбиває дані на кілька підканалів, які передаються одночасно на різних частотах. OFDM є основою багатьох сучасних стандартів, таких як LTE, Wi-Fi (802.11n/ac/ax) і 5G. Цей метод стійкий до міжсимвольних інтерференцій і дозволяє ефективно використовувати частотний спектр.

3. Метод SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) є варіантом OFDM, який використовує один носійний сигнал для зменшення пікових значень сигналу. SC-FDMA часто використовується в стандарті LTE для uplink-зв'язку.

4. Метод CDMA (Code Division Multiple Access) використовує кодування для одночасної передачі даних кількома користувачами на одній частоті. CDMA дозволяє ефективно використовувати спектр, що робить його популярним у мобільних мережах, зокрема, в 3G.

5. Метод модуляції FSK (Frequency Shift Keying) використовує зміни частоти для передачі даних. Він часто застосовується в таких простих системах зв'язку, як радіозв'язок і деякі бездротові технології.

6. Метод модуляції PSK (Phase Shift Keying) змінює фазу носія для передачі даних. Існують різновиди, такі як BPSK (Binary PSK), QPSK (Quadrature PSK) та 8PSK, які використовуються в різних застосунках.

7. Технологія DMT (Discrete Multi-Tone Modulation) використовується в DSL-технологіях для передачі даних через телефонні лінії. DMT є варіантом OFDM і дозволяє розподіляти дані по кількох частотах.

8. Технологія M-ary PSK/QAM є розширенням класичних методів PSK і QAM, де «М» вказує на кількість можливих станів або символів, які можуть бути передані за один сигнал.

9. Технологія Polarization Multiplexing використовується для подвоєння пропускної спроможності в оптичних системах, де дані передаються одночасно в двох поляризаціях. Ці методи модуляції дозволяють відповідати на зростаючі вимоги до швидкості та надійності в телекомунікаційних системах, забезпечуючи ефективну передачу даних у різних умовах.

Вибір оптимального методу модуляції для конкретної системи є критичним етапом проектування телекомунікаційних мереж. Це залежить від переліку факторів, які потрібно ретельно врахувати.

1. Визначення потрібної швидкості передачі даних для системи. Методи вищого порядку (наприклад, 64QAM, 256QAM) можуть забезпечити більшу пропускну спроможність, але вимагають кращих умов сигналу.

2. Оцінювання якості каналу зв'язку, зокрема співвідношення сигнал/шум (SNR), загальні втрати в каналі (наприклад, через розсіювання, відбиття) та наявність завад. При підвищеному впливі завад на інформаційні сигнали краще використовувати методи з нижчими порядками модуляції (наприклад, QPSK або BPSK).

3. Вибір методу модуляції також залежить від стійкості до шуму і спотворень. Такі методи, як OFDM, добре працюють у середовищах з великими міжсимвольними інтерференціями.

4. Різні методи модуляції вимагають різного рівня складності в реалізації. Наприклад, когерентне детектування і цифрова обробка сигналів (DSP) потребують більш складного обладнання, ніж прості методи, такі як OOK.

5. Деякі методи модуляції можуть вимагати більше енергії для передачі даних, що може бути критично важливим для бездротових систем, де енергетичні ресурси обмежені.

6. Вибір методу модуляції також залежить від типу мережі (наприклад, мобільна, стаціонарна, бездротова, оптична). Для мобільних мереж часто використовують CDMA або OFDM, тоді як для оптичних систем – QPSK, DP-QPSK та вищі порядки QAM.

7. Перевірка, що вибраний метод модуляції сумісний з існуючими протоколами та стандартами, які використовуються у вашій мережі.

8. Перевірка, як топологія мережі вплине на вибір методу. Наприклад, для систем з великими відстанями можуть знадобитися методи, які краще компенсують втрати сигналу.

9. Оцінення вартості обладнання та його обслуговування є важливим. Складніші методи модуляції можуть вимагати дорожчого обладнання для передачі та прийому.

10. Врахування майбутніх потреб та потенційного розвитку мережі, щоб обрати метод, який дозволить легко масштабувати системи в майбутньому.

Враховуючи всі ці аспекти, проєктувальники можуть прийняти обґрунтоване рішення щодо вибору оптимального методу модуляції, що відповідатиме вимогам конкретної телекомунікаційної системи.

1.8 Стандарти волоконно-оптичного зв'язку

Стандартизація в галузі волоконної оптики є критично важливою для забезпечення сумісності та ефективності компонентів і систем від різних виробників. Первинні стандарти, як зазначено, охоплюють основні фізичні параметри, що визначають якість волоконно-оптичних технологій. Такі параметри, як загасання і пропускна спроможність, є ключовими для оцінювання продуктивності оптичних систем. Крім того, стандарти тестування компонентів забезпечують методи для перевірки та оцінювання продуктивності таких окремих елементів, як з'єднувачі, кабелі та приймачі. Ці стандарти важливі для гарантування того, що компоненти можуть працювати разом у комплексних системах.

Системні стандарти, зі свого боку, визначають вимоги до цілісних оптичних систем, зокрема мережі та застосунки. Вони забезпечують основу для інтеграції різних елементів в єдину функціонуючу систему. Завдяки роботі таких організацій, як NIST, NPL та PTB, розробляються та впроваджуються стандарти, які сприяють розвитку інновацій у волоконно-оптичних технологіях, підвищують їхню надійність і ефективність на глобальному ринку. Це, також стимулює зростання промисловості та забезпечує більш широкий доступ до новітніх технологій для споживачів та підприємств.

Стандарти тестування компонентів відіграють важливу роль у забезпеченні якості та надійності волоконно-оптичних систем. Вони визначають не лише методи випробувань для оцінювання характеристик таких окремих компонентів, як з'єднувачі, кабелі, модулі передавання та приймання, але й процедури калібрування обладнання, що використовується для цих випробувань. Це забезпечує точність і повторюваність вимірювань, що є критично важливим для досягнення високих стандартів якості в галузі.

Організації, які займаються розробкою стандартів тестування, виконують різні функції у цьому процесі. Наприклад:

- Асоціація волоконної оптики (FOA) активно працює над створенням освітніх матеріалів і ресурсів, що допомагають професіоналам у галузі волоконної оптики впроваджувати передові практики тестування і забезпечення якості;

- Сектор телекомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU-T) займається стандартизацією на глобальному рівні, розробляючи

рекомендації, які можуть бути адаптовані національними стандартами для забезпечення сумісності та інтеграції волоконно-оптичних технологій у міжнародних мережах.;

- Міжнародна електротехнічна комісія (IEC) також бере участь у розробці стандартів, які стосуються електричних компонентів і систем, охоплюючи волоконну оптику, забезпечуючи, щоб ці технології відповідали міжнародним вимогам безпеки та продуктивності. Завдяки зусиллям цих організацій стандарти тестування компонентів стають основою для підвищення ефективності та надійності волоконно-оптичних систем, що, зі свого боку, сприяє розвитку інфраструктури зв'язку та інформаційних технологій в усьому світі.

Системні стандарти є критично важливими для забезпечення належної роботи волоконно-оптичних каналів і мереж. Вони надають методи вимірювання та оцінювання для різних елементів системи, що допомагає гарантувати їхню ефективність, надійність і сумісність. Основні організації, які займаються розробкою цих стандартів, охоплюють:

- Американський національний інститут стандартів (ANSI), який координує стандартизацію в США, забезпечуючи гармонізацію національних і міжнародних стандартів;

- Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE), що розробляє стандарти для широкого спектра технологій, також для волоконної оптики, з особливим акцентом на комунікаційні протоколи та мережі;

- Міжнародний союз електрозв'язку (ITU-T), чий внесок у стандартизацію волоконно-оптичних систем особливо важливий. Рекомендації серії G, зокрема G.650 і вище, охоплюють широкий спектр тем, серед них:

- вимоги до конструкції, характеристик і тестування волоконних кабелів;

- стандарти для забезпечення якості сигналу;

- технології, що дозволяють передавати декілька сигналів через одне волокно;

- стандарти для передачі даних на великі відстані з високою швидкістю;

- оцінювання продуктивності та безвідмовності волоконно-оптичних систем;

- рекомендації щодо моніторингу та управління PON.

Серії L і O ITU-T стосуються методів і обладнання для будівництва, монтажу, технічної підтримки, моніторингу та тестування оптичних кабелів і компонентів в польових умовах. Ці стандарти важливі для забезпечення високої якості обслуговування та швидкого реагування на проблеми, що виникають під час експлуатації систем. Завдяки цим системним стандартам, оператори можуть забезпечити ефективну

інтеграцію волоконно-оптичних технологій у свої мережі, що сприяє підвищенню загальної продуктивності телекомунікаційних систем.

1.9 Висновки

Технологія оптичного зв'язку зазнала вражаючого розвитку з моменту свого впровадження в телекомунікаційні мережі в кінці 1970-х років. Початкові швидкості передачі даних на рівні 6 Мбіт/с на 10-кілометрових лініях зросли до неймовірних 400 Гбіт/с і навіть 1 Тбіт/с у 2020 році, що демонструє величезний прогрес у цій галузі.

Для досягнення таких високих швидкостей розроблено низку інноваційних технологій, які охоплюють:

1. Технологію мультиплексування з поділом довжини хвилі (WDM), яка дозволяє передавати кілька каналів даних одночасно через одне оптичне волокно, використовуючи різні довжини хвиль. Це значно підвищує пропускну спроможність системи;

2. Використання оптичних підсилювачів для підсилення сигналу на великих відстанях, що дозволяє зменшити втрати сигналу і підтримувати високу якість передачі даних;

3. Використання різних методів модулювання, таких як QAM (квадратурна амплітудна модуляція), що дозволяють більш ефективно використовувати доступну смугу пропускання;

4. Використання оптичних транспортних мереж (OTN) для забезпечення більш ефективної передачі даних між різними мережами, дозволяючи об'єднувати різні формати даних і забезпечуючи надійний механізм для їх передачі;

5. З метою забезпечення надійності та ефективності мережі були розроблені різні засоби моніторингу, які дозволяють виявляти проблеми в реальному часі і швидко реагувати на них. Важливим аспектом цього прогресу стало також створення міжнародних стандартів, які регулюють різні аспекти волоконно-оптичних технологій, серед них проектування, встановлення, тестування та експлуатацію. Ці стандарти забезпечують сумісність між обладнанням різних виробників і сприяють розвитку інфраструктури зв'язку на глобальному рівні. Таким чином, технологія оптичного зв'язку продовжує розвиватися, відповідно до зростаючих вимог до швидкості та обсягу передачі даних, що також підтримує стрімкий розвиток цифрових комунікацій в усьому світі.

В подальшому передбачається вивчення фундаментальних принципів волоконно-оптичних технологій, що є важливим етапом для розуміння сучасних мереж зв'язку. Запропонована послідовність тем дозволяє систематично занурюватися в різні аспекти, які формують основи цієї галузі. Ось ключові етапи, які будуть розглянуті:

- вивчення принципів оптики, охоплюючи явища заломлення, відбиття та поглинання світла;

- розгляд різних типів волокон (одномодових і багатомодових) та їхніх характеристик;
- аналіз таких оптичних компонентів, як з'єднувачі, розгалужувачі, підсилювачі та інші елементи, що використовуються в системах передачі;
- оцінювання того, як волоконно-оптичні компоненти інтегруються з такими електронними пристроями, як трансмітери та приймачі;
- розгляд стандартів і протоколів, що забезпечують взаємодію між різними елементами системи;
- дослідження таких різних архітектур волоконно-оптичних мереж, як PON, WDM (мультиплексування за довжиною хвилі) та OTN;
- аналіз продуктивності, охоплюючи швидкість передачі даних, затримку та надійність;
- вивчення технологій, що дозволяють створення складних мереж, які можуть обробляти велику кількість даних з високою ефективністю;
- оцінювання викликів, які виникають при проєктуванні та управлінні такими системами;
- ознайомлення з основними методами вимірювання, потрібними для оцінювання характеристик оптичних мереж;
- розгляд тестових процедур, які слід виконати під час встановлення та обслуговування мереж, щоб забезпечити їхню ефективність і надійність.

Опанування цими темами забезпечить міцну базу знань, потрібну не лише для проєктування сучасних волоконно-оптичних систем, але й для швидкого освоєння нових технологій, що з'являються в цій галузі, що швидко розвивається. Це підготує спеціалістів до роботи з інноваційними рішеннями, які можуть задовольнити зростаючі вимоги до швидкості та якості передачі даних у майбутніх мережах.

1.10 Контрольні завдання

Завдання 1.1 Які енергії в електрон-вольтах (eV) мають фотони на довжинах хвиль 850, 1310, 1490 та 1550 нм? Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 1.2 Фундаментальним аналоговим сигналом є синусоїдальна хвиля, зображена на рис. 1.13. Її три основні характеристики є амплітуда, період або частота і фаза. Амплітуда – це величина форми сигналу, яка вимірюється у вольтах, амперах або ватах залежно від типу сигналу. Частота f – це кількість циклів або коливань за секунду і виражається в одиницях герц (Гц). Період T – величина, обернена до частоти, тобто $T = 1/f$. Параметр фази описує положення форми сигналу відносно нульового моменту часу і вимірюється в градусах або радіанах (рад) причому $180^\circ = \pi$ рад.

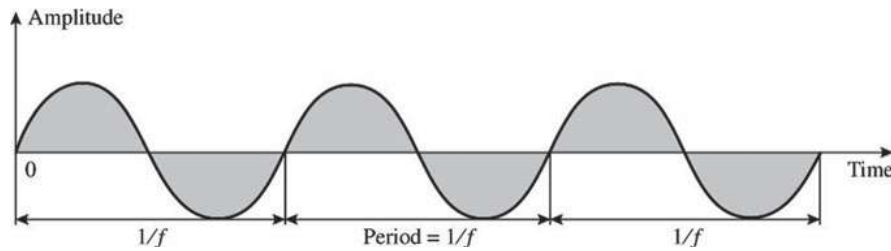


Рисунок 1.13 – Фундаментальний синусоїдальний аналоговий сигнал, що показує амплітуду, період або частоту і фазу

Розглянемо три синусоїди з такими періодами: 25 мс, 250 нс, 125 пс. Які їхні частоти? Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 1.3 Якщо вершини і западини двох синусоїдальних хвиль з однаковим періодом збігаються в один і той самий час, то в один і той же час, то вони знаходяться у фазі. В іншому випадку кажуть, що вони знаходяться в протифазі. Розглянемо дві хвилі, які мають амплітуди $A_1(t)$ і $A_2(t)$, відповідно, в момент часу t . Амплітуда підсумкової хвилі дорівнює $A(t)=A_1(t)+A_2(t)$.

(а) Якщо дві синфазні хвилі мають однакову максимальну амплітуду A і однаковий період, якою буде максимальна амплітуда об'єднаної хвилі? Цей випадок називається конструктивною інтерференцією.

(б) Яка максимальна амплітуда комбінованої хвилі, якщо дві хвилі зсунуті у фазі на 180° (πрад)? Цей випадок називається деструктивною інтерференцією. Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 1.4 Розглянемо два синусоїдальних сигнали, які мають однакову частоту. Припустимо, що другий сигнал зсунутий на чверть циклу відносно першої хвилі. Яким буде фазовий зсув у градусах між цими двома сигналами? Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 1.5 Звичайний цифровий двійковий сигнал подається послідовністю двох типів імпульсів, які називаються бітами. Як показано на рис. 1.14, часовий інтервал, в якому виникає біт, називається бітовим інтервалом або бітовим періодом. Одиничний додатній імпульс називають один біт або 1 біт інформаційних даних, тоді як відсутність імпульсу означає нульовий біт. Бітові інтервали рівномірно розподілені і відбуваються кожні $1/R$ секунд або зі швидкістю R біт за секунду. Залежно від методу кодування сигналу, біт може заповнювати весь бітовий період (рис. 1.14, а) або тільки його частину (рис. 1.14, б).

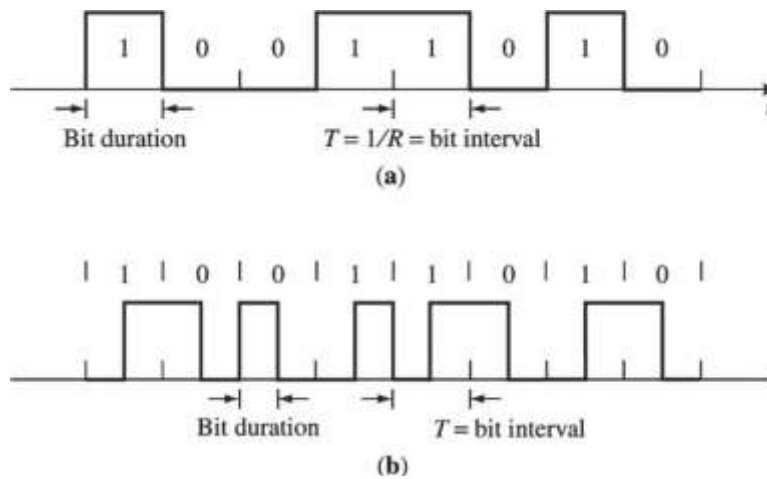


Рисунок 1.14 – Звичайна цифрова двійкова форма сигналу подана послідовністю бітових імпульсів двох типів

Кількість фотонів N в цифровому імпульсі можна знайти зі співвідношення

$$N = \frac{(\text{Pulse width})(\text{Pulse power})}{(\text{Energy/photon in eV})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})}$$

Розглянемо імпульс тривалістю 1 нс з амплітудою 100 нВт на різних довжинах хвиль. Скільки фотонів міститься в такому імпульсі на кожній з вказаних далі довжин хвиль: 850, 1310, 1490 і 1550 нм? Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 1.6 Яка тривалість біта для кожного з трьох сигналів, які мають швидкості передачі 64 кбіт/с, 5 Мбіт/с та 10 Гбіт/с? Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 1.7 Перетворіть нижченаведені абсолютні прирости потужності в децибели: 10^{-3} , 0.3, 1, 4, 10, 100, 500, 2^n . Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 1.8 Перетворіть нижченаведені децибельні прирости потужності в абсолютні прирости потужності: -30 дБ, 0 дБ, 13 дБ, 30 дБ, 10 дБ. Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 1.9 Перетворіть нижченаведені абсолютні рівні потужності в значення в дБм: 1 пВт, 1 нВт, 1 мВт, 10 мВт, 50 мВт. Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 1.10 Переведіть нижченаведені значення в дБм в рівні потужності в одиницях мВт: -13, -6, 6, 17. Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 1.11 Сигнал проходить по волокну з точки А в точку В.

(а) Якщо потужність сигналу становить 1,0 мВт в точці А і 0,125 мВт в точці В, яке загасання у волокну?

(б) Яка потужність сигналу в точці В, якщо загасання становить 15 дБ? Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 1.12 Сигнал проходить через три каскадні підсилювачі, кожен з яких має коефіцієнт підсилення 5 дБ. Чому дорівнює загальний коефіцієнт підсилення в дБ? У скільки разів сигнал підсилюється? Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 1.13 Оптичне волокно довжиною 50 км має загальне загасання 24 дБ. Якщо 500 мкВт оптичної потужності вводиться у волокно, яким буде вихідний рівень оптичної потужності в дБм і в мкВт? Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 1.14 Згідно з теоремою Шеннона, максимальна швидкість передачі даних R в каналі зі смугою пропускання B дорівнює $R = B \log_2(1 + S/N)$, де S/N – відношення сигнал/шум. Припустимо, що лінія передачі має смугу пропускання 2 МГц. Якщо відношення сигнал/шум на приймальному боці становить 20 дБ, яку максимальну швидкість передачі даних може підтримувати задана лінія передавання? Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 1.15 (а) На найнижчому рівні TDM цифрової схеми обслуговування 24 канали зі швидкістю 64 кбіт/с, кожен мультиплексується в канал DS1 зі швидкістю 1,544 Мбіт/с. Яка величина при цьому додається в накладні витрати?

(б) Наступний вищий рівень мультиплексування, швидкість DS2, становить 6,312 Мбіт/с. Скільки каналів DS1 можна розмістити на швидкості DS2 і які при цьому виникають накладні витрати?

(с) Якщо швидкість DS3, яка передається по лінії T3, становить 44,376 Мбіт/с, скільки каналів DS2 можна розмістити на лінії T3, і які при цьому виникають накладні витрати?

(д) Використовуючи наведені вище результати, знайдіть, скільки каналів DS0 можна передати по лінії T3. Чому дорівнює сумарне накладне навантаження? Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

2 ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СТРУКТУРИ ТА ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ПОШИРЕННЯ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ

Фотоніка, як наука, що вивчає генерацію, маніпуляцію та детекцію світла, є ключовою для розвитку волоконно-оптичних технологій. Основним принципом, що лежить в основі волоконно-оптичного зв'язку, є явище світлової хвилі, яке дозволяє світлу подорожувати через оптичне волокно з низьким загасанням і високою швидкістю. Світло є електромагнітною хвилею, що складається з фотонів – частинок без маси, які несуть енергію. Світло може проявляти як хвильові, так і частотні властивості, що описується квантовою теорією.

Основні характеристики світла. Довжина хвилі визначає колір світла. У спектрі видимого світла довжини хвиль варіюються від приблизно 380 нм (фіолетовий) до 750 нм (червоний). Частота визначає енергію фотона; чим вища частота, тим більше енергії несе світло. Амплітуда визначає інтенсивність світла. Світло поширюється в таких діелектричних середовищах, як скло, за рахунок заломлення та відбиття. Коли світло входить в оптичне волокно, що складається зі скляного матеріалу, відбуваються такі ключові процеси: коли світло переходить з одного середовища (наприклад, повітря) в інше (скло), його швидкість змінюється, що призводить до зміни напрямку. Закон Снелліуса описує цей процес. Коли світло досягає межі між двома середовищами, частина світла відбивається назад. Якщо кут падіння перевищує критичний кут, світло повністю відбивається, що є основою для роботи оптичного волокна. У волоконно-оптичних системах світло може поширюватися декількома модами (шляхами), залежно від геометрії волокна та його індексу заломлення. Це дає змогу волокнам з підтримкою багатомодових і одномодових сигналів передавати дані з різною ефективністю. Розуміння фундаментальних принципів поширення світла в таких діелектричних середовищах, як скло, є критично важливим для розробки і оптимізації волоконно-оптичних систем. Це знання дозволяє інженерам і науковцям створювати нові технології, які забезпечують високу швидкість й надійність передачі даних у сучасних комунікаційних мережах.

Далі розглянемо структуру оптичних волокон і два механізми, які показують, як світло рухається вздовж оптичного волокна. Експлуатаційні характеристики оптичного волокна значною мірою визначають загальну продуктивність системи передачі світлових хвиль.

Мета даного розділу – навести деякі фундаментальні відповіді на перші п'ять запитань, щоб досягти розуміння фізичної структури та хвилеводних властивостей оптичних волокон.

Волоконно-оптична технологія передбачає випромінювання, передачу і детектування світла, тому спочатку передбачено розглянути природу світла, а потім розглядати деякі основні закони і означення оптики. Після

опису структури оптичних волокна ми розглянемо два способи опису того, як оптичне волокно спрямовує світло. Перший підхід використовує геометричну або променеву оптичну концепцію відбиття і заломлення світла, щоб надати інтуїтивне уявлення про механізми поширення. У другому підході світло розглядається як електромагнітна хвиля, що поширюється вздовж хвилеводу оптичного волокна. Це передбачає розв'язання рівнянь Максвелла з урахуванням циліндричних граничних умов волокна.

2.1 Походження оптичних сигналів

Уявлення про природу світла зазнали кількох змін протягом історії фізики [1]. До початку сімнадцятого століття вважалося, що світло складається з потоку найдрібніших частинок, які випромінюються джерелами світла. Ці частинки уявляли як такі, що рухаються по прямих лініях, і припускалося, що вони можуть проникати крізь прозорі матеріали, але відбиваються від непрозорих матеріалів. Ця теорія адекватно описувала певні великомасштабні оптичні ефекти, такі як відбиття і заломлення, але не могла пояснити більш дрібномасштабні явища, такі як інтерференція та дифракція.

Френель дав правильне пояснення дифракції у 1815 році. Він показав, що приблизно прямолінійний характер поширення світла можна інтерпретувати, виходячи з припущення, що світло є хвильовим рухом, і що дифракційні смуги, таким чином, можна детально пояснити. Пізніше, у 1864 році Максвелл теоретично обґрунтував, що світлові хвилі мають бути електромагнітними за своєю природою. Крім того, спостереження поляризаційних ефектів показало, що світлові хвилі є поперечними (тобто рух хвилі перпендикулярний до напрямку, в якому рухається хвиля). З цього погляду хвильової оптики, або фізичної оптики, серія послідовних сферичних хвильових фронтів (так званих хвильових потоків), розташованих через рівні проміжки, що називаються довжиною хвилі, може подавати електромагнітні хвилі як випромінювані невеликим оптичним джерелом, розташованим у центрі, рис. 2.1. [8]

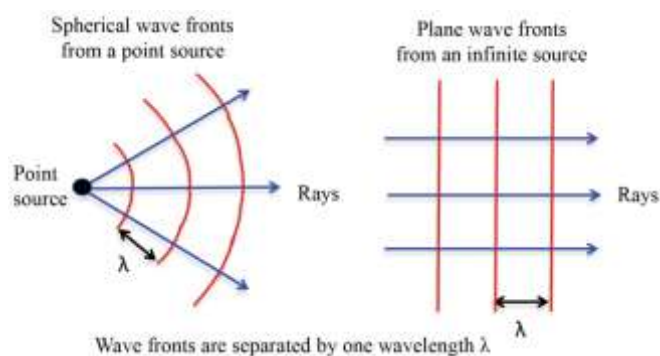


Рисунок 2.1 – Зображення сферичних і плоских хвильових фронтів та пов'язаних з ними променів

Розглянемо фізичну основу для багатьох оптичних ефектів і принципів, що використовуються в оптиці та фізиці хвиль. Коли хвильові фронти зустрічаються з об'єктами, розміри яких значно перевищують довжину хвилі, вони поведуться так, ніби є прямими лініями. Це явище називається геометричною оптикою. У геометричній оптиці можна ігнорувати хвильові властивості світла, і світло можна описувати як промені, що рухаються прямолінійно. Це спрощує аналіз і розуміння того, як світло взаємодіє з такими об'єктами, як лінзи, дзеркала та інші оптичні елементи. Коли ж довжина хвилі світла порівнянна з розмірами об'єкта або отвору, починають проявлятися хвильові властивості світла, такі як дифракція та інтерференція. Дифракція – це явище, при якому хвильові фронти огинають перешкоди або проходять через отвори, утворюючи нові хвильові фронти. Це може призвести до зміни напрямку світла і створення складних патернів, які не можна пояснити лише за допомогою геометричної оптики. Таким чином, розуміння хвильових фронтів і їх властивостей є критично важливим для вивчення оптики, фотоніки та таких багатьох технологічних застосунків, як лазери, волоконна оптика та сучасні оптичні системи. [9]

У цьому випадку світлову хвилю можна уявити як плоску хвилю, а її напрямок руху може бути вказаний світловим променем, який проведений перпендикулярно до фазового фронту, як це показано на рис. 2.1. Концепція світлового променя дозволяє використовувати такі великомасштабні оптичні ефекти, як відбиття і заломлення, вони так? можуть бути проаналізовані за допомогою простого геометричного процесу. Цей погляд на оптику називається променевою або геометричною оптикою. Поняття світлових променів є дуже корисним, оскільки промені показують напрямок потоку енергії у світловому промені.

2.1.1 Поляризація оптичних сигналів

Світло, що випромінюється сонцем або лампою розжарювання, створюється електромагнітними хвилями, які коливаються в різних напрямках. Цей тип світла називається неполяризованим. Світлові хвилі, в яких коливання відбуваються в одній площині, називаються поляризованим світлом. Процес перетворення неполяризованого світла на поляризоване називається поляризацією. Поляризаційні характеристики світлових хвиль важливі при вивченні поведінки таких компонентів, як оптичні ізолятори та фільтри. Отже, світло, яке ми бачимо в повсякденному житті, дійсно, в основному, є неполяризованим. Це означає, що електромагнітні хвилі коливаються в усіх можливих напрямках, перпендикулярних до напрямку поширення. Поляризація світла може виникати внаслідок таких різних процесів, як відбиття, заломлення або розсіювання.

Поляризоване світло має особливі властивості, які можна використовувати в багатьох технічних і наукових застосунках. Наприклад, поляризаційні фільтри дозволяють пропускати лише світло з певною

поляризацією, що може бути корисним у фотографії для зменшення відблисків або в оптиці для контролю світлових потоків. Оптичні ізолятори використовують поляризаційні властивості світла для запобігання зворотному потоку світла в лазерах, що є критично важливим для їх стабільної роботи. Таким чином, вивчення поляризації світла має велике значення в оптиці та фотоніці.

Пристрої, чутливі до поляризації, відіграють важливу роль у сучасній оптиці та фотоніці. Розглянемо деякі з них детальніше.

1. Модулятори світлового сигналу змінюють інтенсивність або поляризацію світла залежно від електричного або оптичного сигналу. Вони використовуються в сучасних комунікаційних системах.

2. Поляризаційні фільтри пропускають світло лише з певною поляризацією, блокуючи інше. Це корисно для зменшення відблисків у фотографії або для поліпшення контрасту в оптичних системах.

3. Фарадеївські ротатори використовують ефект Фарадея для обертання площини поляризації світла. Вони використовуються в лазерах і для захисту оптичних систем від зворотних сигналів.

4. Розгалужувачі променів розділяють пучки світла на кілька шляхів, залежно від їх поляризації. Це важливо для оптичних комутаторів і системи зв'язку.

5. Витіснювачі променів використовуються для зміни поляризації світла і можуть бути важливими в оптичних системах, де потрібна контрольована маніпуляція з поляризацією.

Щодо таких двозаломлюваних кристалів, як кальцит, ніобат літію, рутил і ванадат ітрію, вони дійсно мають унікальні оптичні властивості, які дозволяють їм взаємодіяти з поляризованим світлом. Це робить їх ідеальними для використання в оптичних компонентах, оскільки вони можуть модулювати і змінювати поляризацію світла, а також впливати на його швидкість поширення залежно від поляризації. Світло має електричне поле (Е-поле) і магнітне поле (Н-поле), які коливаються перпендикулярно один до одного та до напрямку поширення хвилі. Це є основою для багатьох оптичних явищ і технологій.

У поперечній хвилі напрямки коливань електричного і магнітного полів перпендикулярні один до одного і знаходяться під прямим кутом до напрямку поширення хвилі, як показано на рис. 2.2. Хвилі рухаються в напрямку, вказаному хвильовим вектором. Величина хвильового вектора k дорівнює $k = 2\pi/\lambda$, яка відома як стала поширення хвилі, де λ – довжина хвилі світла. На основі рівнянь Максвелла можна показати, що E і H перпендикулярні до напрямку поширення. Ця умова визначає плоску хвилю, тобто коливання в електричному полі паралельні один одному в усіх точках хвилі. Таким чином, електричне поле утворює площину, яка називається площиною коливань. Так само всі точки магнітної складової поля хвилі лежать в іншій площині коливань. Крім того, E і H взаємно перпендикулярні, так що E , H і k утворюють набір ортогональних векторів.

Звичайна світлова хвиля складається з багатьох поперечних хвиль, які коливаються в різних напрямках (тобто, більш ніж в одній площині), і називається неполяризованим світлом. Однак будь-який довільний напрямок коливань конкретної поперечної хвилі можна подати як комбінацію двох ортогональних площинних поляризаційних компонент.

Це поняття важливе у разі вивчення відбивання та заломлення світлових хвиль на межі розділу двох різних середовищ, а також у процесі вивчення поширення світла вздовж оптичного волокна. У випадку, коли всі площини електричного поля різних поперечних хвиль вирівняні паралельно одна одній, то світлова хвиля є лінійно поляризованою. Це найпростіший тип поляризації. Отже, неполяризоване світло складається з багатьох поперечних хвиль, які коливаються в різних напрямках, і коли ми говоримо про поляризацію, ми, загалом, маємо на увазі вирівнювання цих коливань.

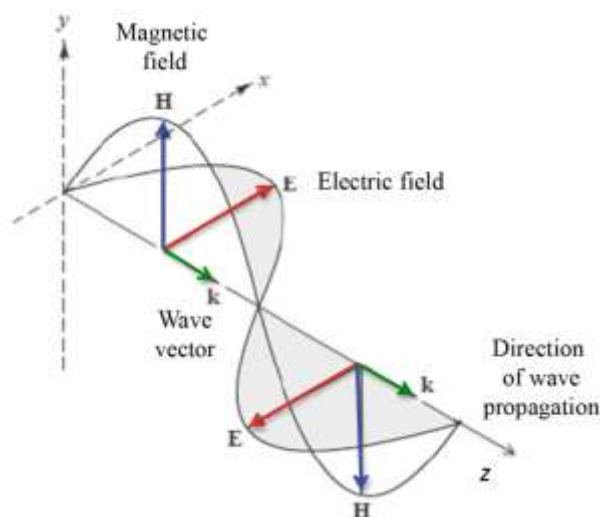


Рисунок 2.2 – Розподіл електричного та магнітного полів у потоці плоских електромагнітних хвиль у заданий момент часу

Коли світло проходить через певні матеріали або відбивається від поверхні, його поляризаційні характеристики можуть змінюватися. Це особливо важливо в контексті коли світло відбивається від поверхні, наприклад, води або скла, частина світла може стати поляризованим. Це явище використовується в поляризаційних фільтрах, які допомагають зменшити відблиски. При переході світла з одного середовища в інше (наприклад, з повітря в воду) змінюється не лише швидкість, а й напрямок його поширення. У процесі заломлення також може відбуватися поляризація світла. Під час поширення світла в оптичних волокнах важливо враховувати поляризаційні властивості, оскільки це може вплинути на якість сигналу. В оптичних волокнах часто використовують технології, які допомагають зберігати поляризацію світла, що покращує ефективність передачі даних. Лінійна поляризація, про яку ви згадали, є найпростішим типом поляризації, де всі електричні поля вирівняні в одній

площині. Існують також інші типи поляризації, такі як кругова та еліптична поляризації, які виникають, коли електричне поле коливається в декількох площинах одночасно. Загалом, вивчення поляризації світла має велике значення в багатьох галузях науки і технології, охоплюючи оптику, телекомунікації, астрономію та, навіть, медицину [10].

2.1.2 Лінійна поляризація

Лінійна поляризація – це один з основних типів поляризації світла, при якому коливання електричного поля відбуваються в одній площині. У цьому випадку всі електричні вектори хвиль, що складають світлову хвилю, вирівняні паралельно один одному, незалежно від напрямку їх поширення. Це означає, що світло коливається лише в одній площині і це робить його поляризованим.

Основні характеристики лінійної поляризації

1. Площина поляризації – це площина, в якій коливається електричне поле. Наприклад, якщо електричне поле коливається у вертикальній площині, то ми говоримо, що світло є вертикально поляризованим.

2. Лінійно поляризоване світло можна отримати за допомогою поляризаційних фільтрів, відбиття від поверхні або розсіювання. Класичним прикладом є використання поляризаційних фільтрів, які пропускають світло лише з певною поляризацією.

3. Лінійна поляризація світла має багато практичних застосунків, зокрема: у фотографії для зменшення відблисків на поверхнях води чи скла; в оптичних системах і лазерах для контролю поляризації світлових променів; у телекомунікаціях, особливо в оптичних волокнах, де важливо управляти поляризацією світла для зменшення втрат сигналу.

4. Коли світло проходить через поляризаційний фільтр, лише компоненти електричного поля, які вирівняні з площиною фільтра, можуть пройти через нього. Інші компоненти блокуються, що приводить до отримання лінійно поляризованого світла. Лінійна поляризація є базовим поняттям в оптиці, що відкриває шлях до розуміння більш складних типів поляризації, таких як кругова і еліптична поляризація, які виникають при більш складних формах коливань електричного поля.

Електричне або магнітне поле потоку плоских лінійно поляризованих хвиль, що поширюються в напрямку $\mathbf{k}$, можна подати в загальному вигляді

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{e}_i A_0 \exp[j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})], \quad (2.1)$$

де $\mathbf{r} = x\mathbf{e}_x + y\mathbf{e}_y + z\mathbf{e}_z$ – вектор загального положення,

$\mathbf{k} = k_x\mathbf{e}_x + k_y\mathbf{e}_y + k_z\mathbf{e}_z$ – вектор поширення хвилі,

A_0 – максимальна амплітуда хвилі,

$\omega = 2\pi\nu$, де ν – частота світла,

$\mathbf{e}_i$ – одиничний вектор, що лежить паралельно осі, позначеній i .

Компоненти дійсного (вимірюваного) електромагнітного поля, наведені в рівнянні (2.1), можна отримати, взявши дійсну частину цього

рівняння. Наприклад, якщо $k = k_z$, і якщо A позначає електричне поле E з осями координат, вибраними таким чином, що $e_i = e_x$, то реальне вимірюване електричне поле має вигляд

$$\mathbf{E}_x(z, t) = \text{Re}(\mathbf{E}) = \mathbf{e}_x E_{0x} \cos(\omega t - kz) = \mathbf{e}_x E_x, \quad (2.2)$$

що є плоскою хвилею, яка гармонічно змінюється при русі в напрямку z .

Тут E_{0x} – максимальна амплітуда хвилі вздовж осі x ,

E_x – амплітуда при заданому значенні z .

Причиною використання експоненціальної форми, показаної в (2.1), є те, що вона легше піддається математичній обробці, ніж еквівалентні вирази, подані в термінах синуса та косинуса. Крім того, обґрунтуванням для використання гармонічних функцій є те, що будь-яка форма сигналу функцій полягає в тому, що будь-яка форма хвилі може бути виражена через синусоїдальні хвилі за допомогою методів Фур'є.

У прикладі плоскої хвилі, заданої рівнянням (2.2), вектор електричного поля завжди спрямований у напрямку назовні. Така хвиля є лінійно поляризованою з вектором поляризації $\mathbf{e}_x$. Загальний стан поляризації можна описати, розглядаючи іншу лінійно поляризовану хвилю, яка не залежить від першої хвилі і є ортогональною до неї. Нехай ця хвиля буде

$$\mathbf{E}_y(z, t) = \mathbf{e}_y E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta) = \mathbf{e}_y E_y, \quad (2.3)$$

де δ – відносна різниця фаз між хвилями. Подібно до рівняння (2.2),

E_{0y} – максимальна амплітуда хвилі вздовж осі y ,

E_y – амплітуда при заданому значенні z .

Підсумкова хвиля має вигляд

$$\mathbf{E}(z, t) = \mathbf{E}_x(z, t) + \mathbf{E}_y(z, t). \quad (2.4)$$

Якщо δ дорівнює нулю або цілому числу, кратному 2π , то хвилі синфазні. Рівняння (2.4) також є лінійно поляризованою хвилею з вектором поляризації, що складає кут

$$\theta = \arctan \frac{E_{0y}}{E_{0x}} \quad (2.5)$$

відносно $\mathbf{e}_x$ та має величину

$$E = (E_{0x}^2 + E_{0y}^2)^{1/2}. \quad (2.6)$$

Цей випадок схематично показано на рис. 2.3. І навпаки, так само, як будь-які дві ортогональні плоскі хвилі можна об'єднати в лінійно поляризовану хвилю, довільну лінійно поляризовану хвилю можна

розкласти на дві незалежні ортогональні плоскі хвилі, які знаходяться у фазі [11].

Приклад 2.1 Загальна форма електромагнітної хвилі має вигляд

$$y = (\text{amplitude in } \mu\text{m}) \times \cos(\omega t - kz) = A \cos[2\pi(\nu t - z/\lambda)] .$$

Знайти: (a) амплітуду, (b) довжину хвилі, (c) кутову частоту і (d) зміщення в момент часу $t = 0$ і $z = 4$ мкм заданої плоскої електромагнітної хвилі, яка описується рівнянням $y = 12 \cos [2\pi(3t - 1.2z)]$.

Розв'язання. З наведеного вище загального хвильового рівняння для y випливає, що

(a) Амплітуда: 12 мкм

(b) Довжина хвилі: $1/\lambda = 1,2 \text{ мкм}^{-1}$ отже, $\lambda = 833 \text{ нм}$

(c) Кутова частота $\omega = 2\pi\nu = 2\pi(3) = 6\pi$

(d) При $t = 0$ і $z = 4$ мкм маємо, що зміщення дорівнює

$$y = 12 \cos [2\pi(-1.2 \text{ мкм}^{-1})(4 \text{ мкм})] = 12 \cos[2\pi(-4.8)] = 10.38 \text{ мкм}$$

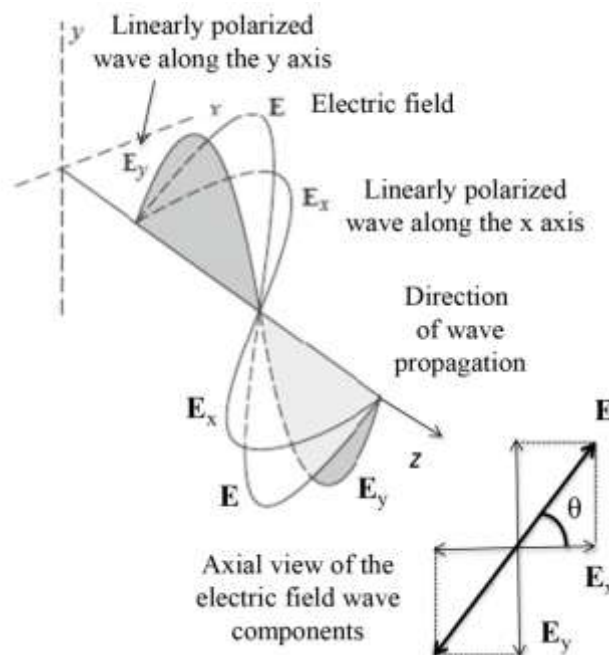


Рисунок 2.3 – Додавання двох лінійно поляризованих хвиль з нульовою відносною фазою між ними

2.1.3 Еліптична та кругова поляризація

Поляризація світла може бути подана не лише в лінійній формі, але й у таких більш складних формах, як еліптична та кругова поляризація. Давайте розглянемо ці два типи поляризації детальніше. Лінійна поляризація відбувається, коли всі електричні поля світлових хвиль вирівняні в одній площині. Це найпростіший і найбільш зрозумілий тип поляризації. Наприклад, якщо світло проходить через поляризаційний

фільтр, який допускає тільки певну площину поляризації, підсумкове світло буде лінійно поляризованим. Кругова поляризація виникає, коли два лінійно поляризовані світлові хвилі, які знаходяться в одній площині, мають однакову амплітуду, але відрізняються за фазою на 90 градусів ($\pi/2$ радіан). У цьому випадку електричне поле світла описує спіральний шлях, який обертається у напрямку до спостерігача (право- або лівообертове). Правообертове кругове поляризоване світло утворюється, коли електричне поле обертається за годинниковою стрілкою, коли ви дивитеся в напрямку поширення світла. Лівообертове кругове поляризоване світло утворюється, коли електричне поле обертається проти годинникової стрілки.

Еліптична поляризація є більш загальним випадком, який охоплює як кругову, так і лінійну поляризацію. У цьому випадку електричне поле світлової хвилі описує еліпс у площині, перпендикулярній до напрямку поширення. Еліптична поляризація може бути отримана, якщо дві лінійно поляризовані хвилі з різними амплітудами і фазами накладаються одна на одну. Розуміння еліптичної та кругової поляризацій є важливим у таких багатьох технологічних застосунках, як: оптичні комунікації; лазерна технологія; вивчення молекулярної структури матеріалів; оптичні системи, де контроль поляризації є критичним, наприклад, у 3D-кінотеатрах та у фільтрах. Таким чином, поляризація світла, зокрема лінійна, кругова та еліптична, є важливим аспектом оптики, що має численні застосунки в науці та техніці. [12].

Еліптична і кругова поляризації – це два типи поляризації світла, які описують, як електричне поле світлової хвилі коливається в часі. У випадку кругової поляризації електричне поле світлової хвилі обертається навколо напрямку поширення хвилі, описуючи коло. При цьому компоненти електричного поля, що коливаються в двох ортогональних площинах, мають однакову амплітуду, але відрізняються за фазою на 90 градусів (або $\pi/2$ радіан). Якщо обертання електричного поля відбувається за годинниковою стрілкою, ми говоримо про праву кругову поляризацію; якщо проти годинникової стрілки – про ліву кругову поляризацію.

У випадку еліптичної поляризації електричне поле також обертається навколо напрямку поширення, але описує еліпс замість кола. Тут компоненти електричного поля в двох ортогональних площинах можуть мати різну амплітуду, а також можуть бути зсунуті у фазі на будь-який кут. Еліптична поляризація є більш загальним випадком, кругова ж поляризація є особливим випадком, коли обидві амплітуди однакові. Таким чином, основна різниця між круговою і еліптичною поляризацією полягає у формі траєкторії, яку описує електричне поле: кругова поляризація має кругову колову траєкторію, тоді як еліптична – еліптичну.

Для загальних значень δ -хвиля, що описується рівнянням (2.4), є еліптично поляризованою. Підсумковий вектор поля E буде як обертатися, так і змінювати свою величину як функцію кутової частоти ω . Усунення

залежності $(\omega t - kz)$ між рівняннями (2.2) і (2.3) для загального значення δ дає

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)\cos\delta = \sin^2\delta, \quad (2.7)$$

що є загальним рівнянням еліпса. Таким чином, як показано на рис. 2.4, кінцева точка E описує еліпс у заданій точці простору. Вісь еліпса утворює з віссю x кут α , який задається формулою

$$\tan 2\alpha = \frac{2E_{0x}E_{0y}\cos\delta}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2}. \quad (2.8)$$

Вирівнювання головної осі еліпса з віссю x дає кращу картину рівняння (2.7). У цьому випадку $\alpha=0$, або, еквівалентно, $\delta=\pm\pi/2, \pm3\pi/2, \dots$, так що рівняння (2.7) набуває вигляду

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 = 1. \quad (2.9)$$

Це рівняння еліпса з початком координат у центрі та півсями, що дорівнюють E_{0x} та E_{0y} .

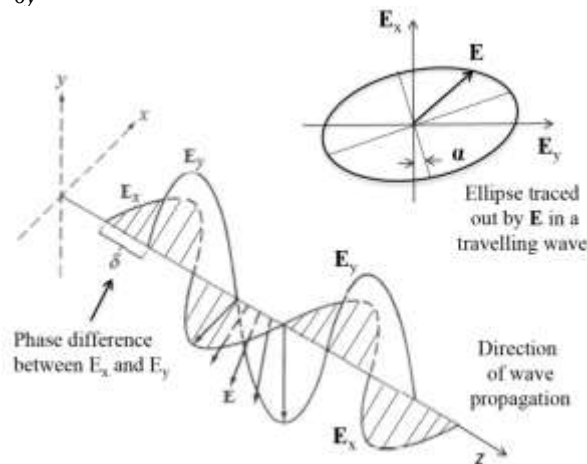


Рисунок 2.4 – Еліптично поляризоване світло виникає в результаті додавання двох лінійно поляризованих хвиль неоднакової амплітуди з ненульовою різницею фаз δ між ними

Коли $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ і відносна різниця фаз $\delta = \pm\pi/2 + 2m\pi$, де $m=0, \pm1, \pm2, \dots$, то світло є циркулярно поляризованим. У цьому випадку рівняння (2.9) зводиться до

$$E_x^2 + E_y^2 = E_0^2, \quad (2.10)$$

яка визначає коло.

Вибираючи додатний знак для δ , рівняння (2.2) і (2.3) набувають вигляду

$$\mathbf{E}_x(z, t) = \mathbf{e}_x E_0 \cos(\omega t - kz), \quad (2.11)$$

$$\mathbf{E}_y(z, t) = -\mathbf{e}_y E_0 \sin(\omega t - kz). \quad (2.12)$$

У цьому випадку кінцева точка $\mathbf{E}$ опише коло в заданій точці простору, як показано на рис. 2.5. Щоб побачити це, розглянемо спостерігача, який знаходиться в довільній точці z_{ref} , до якої рухається хвиля. Для зручності покладемо початок відліку в точці $z = \pi/k$ при $t = 0$. Тоді з рівнянь (2.11) і (2.12) випливає, що

$$\mathbf{E}_x(z, t) = -\mathbf{e}_x E_0 \text{ and } \mathbf{E}_y(z, t) = 0,$$

так що $\mathbf{E}$ лежить вздовж від'ємної осі x , як показано на рис. 2.5.

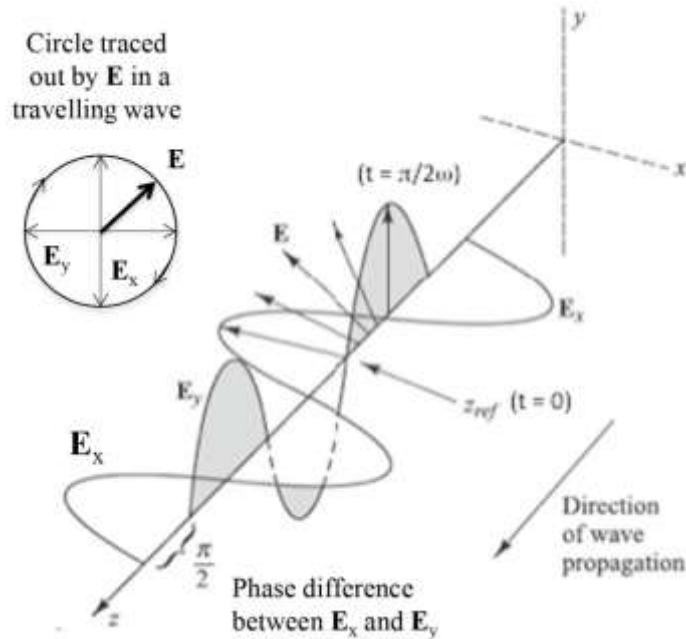


Рисунок 2.5 – Додавання двох рівноамплітудних лінійно поляризованих хвиль з відносною різницею фаз $\delta = \pi/2 + 2m\pi$ дає праву циркулярно поляризовану хвилю

Пізніше, скажімо, через $t = \pi/2\omega$, вектор електричного поля повернувся на 90° і тепер лежить вздовж додатної осі y в точці z_{ref} . Таким чином, коли хвиля рухається до спостерігача зі збільшенням часу, підсумковий вектор електричного поля $\mathbf{E}$ обертається за годинниковою стрілкою з кутовою частотою ω . Він робить один повний оберт, коли хвиля проходить одну довжину хвилі. Така світлова хвиля є правою циркулярно поляризованою.

Якщо для δ вибрати від'ємний знак, то вектор електричного поля матиме вигляд

$$\mathbf{E} = E_0[\mathbf{e}_x \cos(\omega t - kz) + \mathbf{e}_y \sin(\omega t - kz)] . \quad (2.13)$$

Тепер $\mathbf{E}$ обертається проти годинникової стрілки, і хвиля залишається циркулярно поляризованою.

2.1.4 Квантові аспекти оптичних сигналів

Хвильова теорія світла адекватно пояснює всі явища, пов'язані з передачею світла. Однак, коли йдеться про взаємодію світла з речовиною, наприклад при дисперсії, випромінюванні та поглинанні світла, ні корпускулярна теорія світла, ні хвильова теорія світла не підходять. Натомість слід звернутися до квантової теорії, яка вказує на те, що оптичне випромінювання має як корпускулярні, так і хвильові властивості.

Як впливає зі спостереження, світлова енергія завжди випромінюється або поглинається дискретними одиницями, які називаються квантами або фотонами. У всіх експериментах, які використовуються, щоб показати існування фотонів, виявляється, що енергія фотонів залежить тільки від частоти ν . Ця частота, зокрема, має бути виміряна шляхом спостереження за хвильовими властивостями світла [1].

Фізичні властивості фотона можна виміряти через його довжину хвилі, енергію або частоту. Взаємозв'язок між енергією E і частотою ν фотона описується формулою

$$E = h\nu , \quad (2.14)$$

де $h = 6,6256 \times 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка.

Коли світло падає на атом, фотон може передати свою енергію електрону всередині атома, тим самим збуджуючи його на вищий енергетичний рівень. У цьому процесі електрону передається або вся енергія фотона, або не передається зовсім. Енергія, поглинута електроном, має точно дорівнювати енергії, необхідної, щоб електрон перейшов на вищий енергетичний рівень. І навпаки, електрон у збудженому стані може перейти в нижчий стан, відокремлений від нього енергією $h\nu$, випромінюючи фотон саме з такою енергією.

Приклад 2.1. Використовуючи рівняння (2.14), покажіть, що відповідні довжини хвиль фотонів з енергіями 0.95 eV і 0.80 eV дорівнюють 1310 нм і 1550 нм, відповідно. Оскільки енергія фотона в цьому випадку задана в електрон-вольтах (eV), її потрібно перетворити в джоулі. Наведемо простий лістинг програми мовою Python, яка обчислює довжину хвилі для енергій 0.95 eV і 0.80 eV:

```
# Константи
h = 6.626e-34 # Стала Планка в Дж·с
```

```

c = 3.0e8      # Швидкість світла в м/с
eV_to_J = 1.602e-19 # Перетворення електрон-вольтів в джоулі
# Енергії у eV
energies_eV = [0.95, 0.80]
# Обчислення довжини хвилі
for E_eV in energies_eV:
    E_J = E_eV * eV_to_J # Перетворення енергії в джоулі
    wavelength = h * c / E_J # Обчислення довжини хвилі в метрах
    print(f'Довжина хвилі для енергії {E_eV} eV: {wavelength:.2e} м")

```

Виконавши цей код ви отримаєте довжини хвиль для фотонів з енергіями 0.95 eV і 0.80 eV.

Довжина хвилі для енергії 0.95 eV: 1.31×10^{-6} м

Довжина хвилі для енергії 0.8 eV: 1.55×10^{-6} м

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

Приклад 2.2 (а) Розглянемо вхідний фотон, який «підштовхує» електрон з основного рівня E_1 на збуджений рівень E_2 . Якщо енергія вхідного фотона $E = E_2 - E_1 = 1.512$ eV, то яка довжина хвилі цього фотона?

(б) Тепер припустимо, що цей збуджений електрон втрачає частину своєї енергії і переходить на трохи нижчий енергетичний рівень E_3 . Якщо електрон потім повернеться назад на рівень E_1 , випромінюючи фотон з енергією $E_3 - E_1 = 1.450$ eV, яка довжина хвилі випромінюваного фотона?

Розв'язання. (а) Повертаючись до п. 1.2, з рівнянь (1.2) і (1.3),

$$\lambda_{\text{падаючого}} = 1.2405 / 1.512 \text{ eV} = 0.820 \text{ мкм} = 820 \text{ нм}.$$

(б) З рівнянь (1.2) і (1.3),

$$\lambda_{\text{випромінювання}} = 1.2405 / 1.450 \text{ eV} = 0.855 \text{ мкм} = 855 \text{ нм}.$$

2.2 Основні закони та означення волоконної оптики

У волоконно-оптичних технологіях передачі інформації використовуються основні закони оптики, які визначають поведінку світла у процесі проходження через різні середовища.

Наведемо короткий огляд ключових понять:

1. *Закон Снелла* описує заломлення світла у разі переходу з одного середовища в інше.

2. *Показник заломлення* характеризує, наскільки швидко світло проходить через матеріал порівняно з вакуумом.

3. *Відбиття* – це процес, в ході якого світло, що падає на межу двох середовищ, повертається назад у перше середовище. Відбиття може бути повним або частковим. У волоконній оптиці відбиття є критичним для

утримання світла всередині волокна, що дозволяє зберігати і передавати інформацію.

4. *Заломлення* – це зміна напрямку світлового променя, коли він проходить через межу між двома різними середовищами. Заломлення відбувається внаслідок зміни швидкості світла, і його величина визначається згідно з законом Снелла.

5. *Поляризація* – це явище, у ході якого коливання електромагнітної хвилі (світла) відбуваються в певній площині. Поляризація може виникати в результаті відбиття або заломлення світла, а також може бути досягнута за допомогою спеціальних поляризаторів. У волоконно-оптичних системах поляризація може впливати на ефективність передачі сигналу і на якість зв'язку.

Вказані поняття є основою для розуміння волоконно-оптичних технологій, які забезпечують швидку та ефективну передачу інформації на великі відстані.

2.2.1 Поняття показника заломлення

Фундаментальним оптичним параметром матеріалу є показник заломлення. У вільному просторі світло поширюється зі швидкістю $c = 2,99793 \times 10^8 \text{ м/с} \approx 3 \times 10^8 \text{ м/с}$. Швидкість світла пов'язана з частотою ν і довжиною хвилі λ співвідношенням $c = \nu\lambda$. Потрапляючи в діелектричне або непровідне середовище, хвиля тепер рухається зі швидкістю, яка характерна для матеріалу і є меншою за c . Відношення швидкості світла у вакуумі до швидкості світла в речовині є показником заломлення n матеріалу і визначається рівнянням (2.15). Репрезентативні значення наведено в таблиці 2.1.

$$n = \frac{c}{s} \quad (2.15)$$

Таблиця. 2.1 – Значення показників заломлення для різних середовищ

Material	Refractive index
Acetone	1.356
Air	1.000
Diamond	2.419
Ethyl alcohol	1.361
Fused quartz (SiO ₂): varies with wavelength	1.453 @ 850 nm
Gallium arsenide (GaAs)	3.299 (infrared region)
Glass, crown	1.52-1.62
Glycerin	1.473
Polymethylmethacrylate (PMMA)	1.489
Silicon (varies with wavelength)	3.650 @ 850 nm
Water	1.333

2.2.2 Основи теорії відбиття та заломлення оптичних сигналів

Поняття відбиття і заломлення можна інтерпретувати, розглядаючи поведінку світлових променів, що асоціюються з плоскими хвилями, які поширюються в діелектричному матеріалі.

Коли світловий промінь нашоухується на межу, що розділяє два різних діелектричних середовища, частина променя відбивається назад в перше середовище, а решта викривляється (або заломлюється, коли промінь потрапляє в друге середовище). Це показано на рис. 2.6 для межі розділу двох матеріалів з показниками заломлення n_1 і n_2 , де $n_2 < n_1$. Згинання або заломлення світла, викривлення або заломлення світлового променя на межі розділу є результатом різниці в швидкості світла у двох матеріалах з різними показниками заломлення.

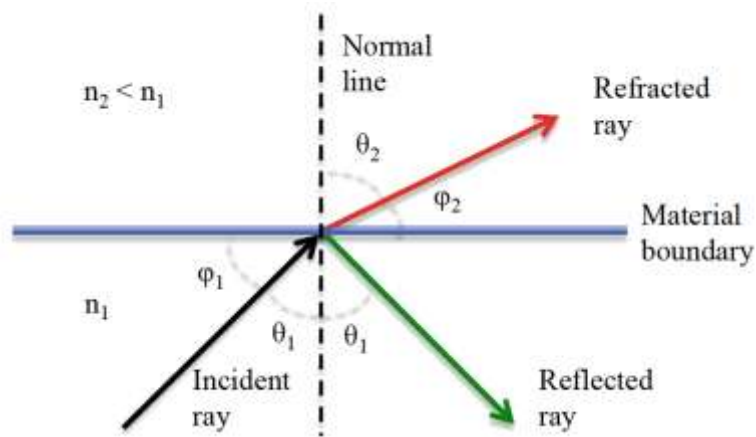


Рисунок 2.6 – Заломлення та відбиття світлового променя на межі поділу матеріалів

Відношення на межі поділу фаз відоме як закон Снелла і має вигляд

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (2.16, a)$$

або, еквівалентно, як

$$n_1 \cos \varphi_1 = n_2 \cos \varphi_2. \quad (2.16, b)$$

де кути визначені на рис. 2.6. Кут θ_1 між падаючим променем і нормаллю до поверхні називається кутом падіння.

Згідно з законом відбиття, кут θ_1 , під яким падаючий промінь падає, точно дорівнює куту, який утворює відбитий промінь з нормальною лінією до тієї самої межі розділу. Крім того, падаючий промінь, нормаль до межі поділу та відбитий промінь лежать в одній площині, яка перпендикулярна до площини поділу між двома матеріалами. Ця площина називається *площиною падіння*.

Коли світло, рухаючись у певному середовищі, відбивається від оптично щільнішого матеріалу (з вищим показником заломлення), цей

процес називається зовнішнім відбиттям. І навпаки, відбиття світла від менш оптично щільного матеріалу (наприклад, світло, що рухається у склі, відбивається на межі розділу скло – повітря) називається внутрішнім відбиттям.

Коли кут падіння θ_1 в оптично щільнішому матеріалі стає більшим, кут заломлення θ_2 наближається до $\pi/2$. Поза цією точкою заломлення неможливе, оскільки кут падіння збільшується, і світлові промені зазнають повного внутрішнього відбивання.

Умови, потрібні для повного внутрішнього відбивання світлового променя, можна визначити за допомогою закону Снелла. Розглянемо рис. 2.7, на якому зображено скляну поверхню в повітрі. Світловий промінь вигинається до поверхні скла, коли він виходить зі скла, відповідно до закону Снелла.

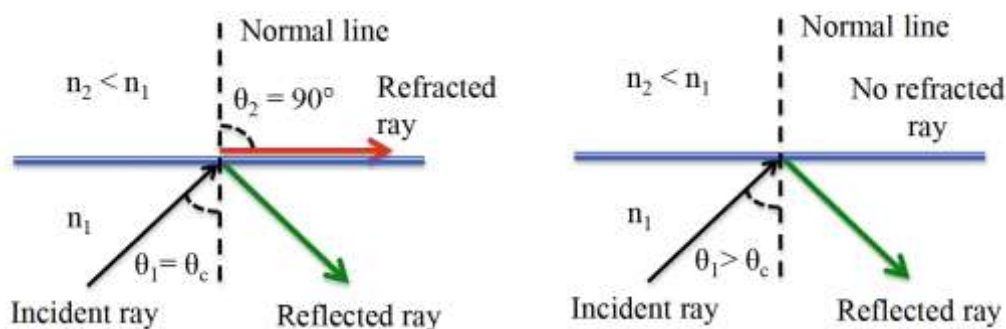


Рисунок 2.7 – Подання критичного кута і повної внутрішньої рефракції на межі розділу скло – повітря, де n_1 – показник заломлення скла

Якщо кут падіння θ_1 збільшувати, то, врешті-решт, буде досягнута точка, коли промінь світла в повітрі буде паралельний поверхні скла. Ця точка відома як критичний кут падіння θ_c . Коли кут падіння θ_1 більший за критичний, виконується умова повного внутрішнього відбиття, тобто світло повністю відбивається назад у скло, і світло не виходить з поверхні скла.

Щоб знайти критичний кут, розглянемо закон Снелла, який описується рівнянням (2.16). Критичний кут досягається, коли $\theta_2 = 90^\circ$, тобто, $\sin \theta_2 = 1$. Підставивши це значення θ_2 у рівняння (2.16), покажемо, що критичний кут визначається, таким чином, з умови

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2.17)$$

Приклад 2.3 Розглянемо межу розділу між гладким діелектриком з $n_1 = 1.48$ і повітрям, для якого $n_2 = 1.00$. Який критичний кут для проходження світла в діелектрику?

Розв'язання. З рівняння (2.17) випливає, що для світла, яке поширюється в діелектрику, критичний кут дорівнює

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} = \sin^{-1} 0.676 = 42.5^\circ.$$

Таким чином, будь-який світловий промінь, що рухається в діелектричному матеріалі і падає на межу розділу матеріал – повітря під кутом θ_1 до нормалі (як показано на рис. 2.7), що перевищує $42,5^\circ$, повністю відбивається назад у діелектрик.

Наведемо приклад програми мовою Python, яка обчислює критичний кут.

```
import math
def critical_angle(n1, n2):
    # Перевірка, чи можливе виникнення критичного кута
    if n2 >= n1:
        return None # Критичний кут не існує, якщо n2 >= n1
    # Обчислення критичного кута в радіанах
    theta_c_radians = math.asin(n2 / n1)

    # Переведення в градуси
    theta_c_degrees = math.degrees(theta_c_radians)

    return theta_c_degrees
# Приклад використання
if __name__ == "__main__":
    n1 = float(input("Введіть показник заломлення першого
середовища (n1): "))
    n2 = float(input("Введіть показник заломлення другого середовища
(n2): "))

    angle = critical_angle(n1, n2)

    if angle is not None:
        print(f"Критичний кут: {angle:.2f} градусів")
    else:
        print("Критичний кут не існує (n2 повинно бути менше n1).")
```

Алгоритм програми:

1. Програма запитує вхідні дані – показники заломлення n_1 та n_2 .
2. Вона перевіряє, чи можливо визначити критичний кут (тобто, чи виконується умова $n_2 < n_1$).
3. Якщо умова виконується, обчислюється критичний кут у радіанах, а потім переводиться в градуси.
4. Результат виводиться на екран.

Введіть показник заломлення першого середовища (n1):

1.48

Введіть показник заломлення другого середовища (n2):

1.00

Критичний кут: 42.51 градусів

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

Критичний кут існує лише в випадку, коли світло переходить з середовища з більшим показником заломлення (наприклад, скло) в середовище з меншим показником заломлення (наприклад, повітря).

Приклад 2.4. Світловий промінь, що рухається в повітрі ($n = 1.00$), падає на гладку пласку пластину з корончатого скла, що має показник заломлення $n_2 = 1.52$. Якщо промінь, що падає, утворює кут $\theta_1 = 30.0^\circ$ відносно нормалі, то який кут заломлення θ_2 у склі?

Розв'язання. За законом Снелля, що задається рівнянням (2.16),

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 = \frac{1.00}{1.52} \sin 30^\circ = 0.658 \times 0.50 = 0.329$$

Отже, $\theta_2 = \sin^{-1}(0.329) = 19.2^\circ$.

Наведемо програму мовою Python, яка визначає кут заломлення оптичного сигналу в склі з показником заломлення 1.52, якщо кут падіння становить 30 градусів відносно нормалі:

```
import math
def refraction_angle(theta1, n1, n2):
    # Переводимо кут падіння в радіани
    theta1_radians = math.radians(theta1)

    # Обчислюємо sin(theta2) за формулою
    sin_theta2 = (n1 / n2) * math.sin(theta1_radians)

    # Перевірка на можливість заломлення
    if sin_theta2 > 1:
        return None # Заломлення неможливе (знак sin перевищує 1)

    # Обчислюємо кут заломлення в радіанах
    theta2_radians = math.asin(sin_theta2)

    # Переводимо в градуси
    theta2_degrees = math.degrees(theta2_radians)

    return theta2_degrees
# Приклад використання
if __name__ == "__main__":
```

```

theta1 = 30 # кут падіння в градусах
n1 = 1.0    # показник заломлення повітря
n2 = 1.52   # показник заломлення скла

angle = refraction_angle(theta1, n1, n2)

if angle is not None:
    print(f"Кут заломлення: {angle:.2f} градусів")
else:
    print("Заломлення неможливе (sin(theta2) > 1).")

```

Алгоритм виконання програми:

1. Визначається кут падіння та показники заломлення.
2. Програма обчислює формулу, яка базується на законі Снелла.
3. Перевіряється, чи можливе заломлення.
4. Якщо заломлення можливе, обчислюється кут заломлення в радіанах, а потім конвертується в градуси.
5. Результат (кут заломлення) виводиться на екран.

Кут заломлення: 19.20 градусів

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

Приклад 2.5. Розглянемо границю розділу між поверхнею GaAs з показником заломлення $n_1 = 3.299$ і повітрям, для якого $n_2 = 1.000$. Показати, що критичний кут становить $\theta_c = 17.6^\circ$.

Наведемо приклад програми мовою Python, яка обчислює критичний кут для даного показника заломлення.

```

import math
def critical_angle(n1, n2):
    # Перевірка, чи можливе виникнення критичного кута
    if n2 >= n1:
        return None # Критичний кут не існує, якщо n2 >= n1
    # Обчислення критичного кута в радіанах
    theta_c_radians = math.asin(n2 / n1)

    # Переведення в градуси
    theta_c_degrees = math.degrees(theta_c_radians)

    return theta_c_degrees
# Приклад використання
if __name__ == "__main__":
    n1 = 3.299 # Показник заломлення середовища
    n2 = 1.0   # Показник заломлення повітря

```

```
angle = critical_angle(n1, n2)
```

```
if angle is not None:
```

```
    print(f"Критичний кут: {angle:.2f} градусів")
```

```
else:
```

```
    print("Критичний кут не існує (n2 повинно бути менше n1).")
```

Алгоритм роботи програми:

1. Програма визначає показник заломлення середовища $n_1 = 3.299$ і показник заломлення повітря $n_2 = 1.0$.

2. Вона перевіряє, чи можливо визначити критичний кут (умова $n_2 < n_1$).

3. Якщо умова виконується, обчислюється критичний кут у радіанах, а потім він переводиться в градуси.

4. Результат виводиться на екран.

Критичний кут: 17.65 градусів

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

Критичний кут існує лише у випадку, якщо світло переходить з середовища з більшим показником заломлення (у цьому випадку 3.299) в середовище з меншим показником заломлення (1.0).

Важливим фактором для оптичних ліній зв'язку є коефіцієнт відбиття світла, що падає на межі розділу між двома волокнами або між волокном і матеріалом іншого типу, наприклад, повітрям, джерелом світла або фотоприймачем. Ця ситуація показана на рис. 2.8 для світла, яке падає перпендикулярно на межу розділу між матеріалами з показниками заломлення n_1 і n_2 .

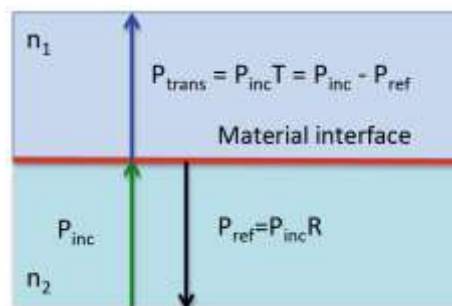


Рисунок 2.8 – Відбиття потужності для світла, що падає нормально на межу розділу між двома різними типами матеріалів

Типовим випадком у волоконно-оптичних лініях зв'язку є межа розділу між кінцем оптичного волокна і повітрям. Частка падаючої

потужності, яка відбивається на межі розділу, визначається коефіцієнтом відбиття R

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2. \quad (2.18, a)$$

Відповідна частка оптичної потужності, яка проходить через межу поділу матеріалів, визначається коефіцієнтом пропускання T

$$T = \frac{4n_1n_2}{(n_1 + n_2)^2}. \quad (2.18, b)$$

Ці вирази отримані з аналізу коефіцієнтів відбиття Френеля [3], наведеного в додатку до цього розділу. Зверніть увагу, що $R + T = 1$. Крім того, коли світло повністю внутрішньо відбивається, у відбитій хвилі відбувається зміна фази δ . Ця зміна фази залежить від кута $\theta < \pi/2$ -ф згідно зі співвідношеннями

$$\tan \frac{\delta_N}{2} = \frac{\sqrt{n^2 \cos^2 \theta_1 - 1}}{n \sin \theta_1}, \quad (2.19, a)$$

$$\tan \frac{\delta_P}{2} = \frac{\sqrt{n^2 \cos^2 \theta_1 - 1}}{\sin \theta_1}, \quad (2.19, b)$$

тут δ_N і δ_P – фазові зсуви компонент хвиль електричного поля, нормальних і паралельних до площини падіння, відповідно, а $n = n_1/n_2$.

2.2.3 Поляризаційні характеристики оптичних сигналів

Загальна світлова хвиля складається з багатьох поперечних електромагнітних хвиль, які коливаються у різних напрямках (тобто, більш ніж в одній площині) і називається неполяризованим світлом. Однак можна подати будь-який довільний напрямок коливань як комбінацію паралельних і перпендикулярних коливань, як показано на рис. 2.9.

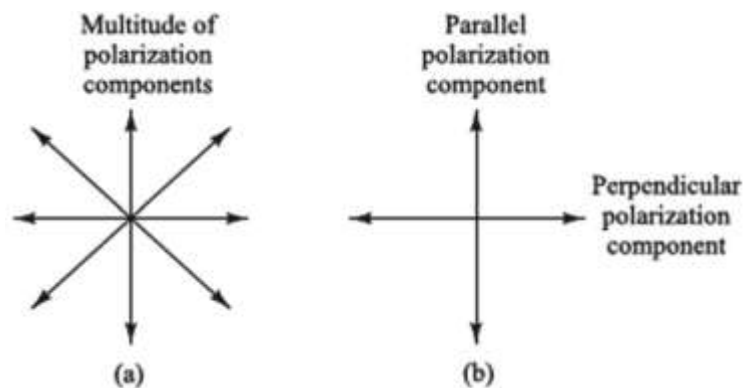


Рисунок 2.9 – Поляризація, подана як комбінація паралельного та перпендикулярного коливань

Таким чином, можна розглядати неполяризоване світло як таке, що складається з двох ортогональних плоских поляризаційних компонент, а саме: однієї, що лежить у площині падіння (площина, що містить падаючий і відбитий промені), та іншої, що лежить у площині, перпендикулярній до площини падіння. Це паралельна та перпендикулярна поляризації компоненти, відповідно. У випадку, коли всі площини електричного поля різних поперечних хвиль вирівняні паралельно одна одній, тоді світлова хвиля є лінійно поляризованою. Це найпростіший тип поляризації, як описано в пункті 2.1.1.

Неполяризоване світло може бути розділене на окремі поляризаційні компоненти або шляхом відбиття від неметалевої поверхні, або заломленням, коли світло проходить від одного матеріалу в інший. Як показано на рис. 2.10, коли неполяризований промінь світла, що рухається в повітрі, падає на неметалеву поверхню, наприклад, на скло, частина променя відбивається, а частина заломлюється в склі. Обведена крапка і стрілка позначають паралельну і перпендикулярну, відповідно, складові поляризації на рис. 2.10.

Відбитий промінь частково поляризований і під певним кутом (відомим як кут Брюстера) відбите світло повністю перпендикулярно поляризоване. Паралельна складова заломленого променя повністю проходить крізь скло, тоді як перпендикулярна заломлюється лише частково. В результаті частина заломленого світла є поляризованим, що залежить від кута, під яким світло падає на поверхню, і від складу матеріалу.

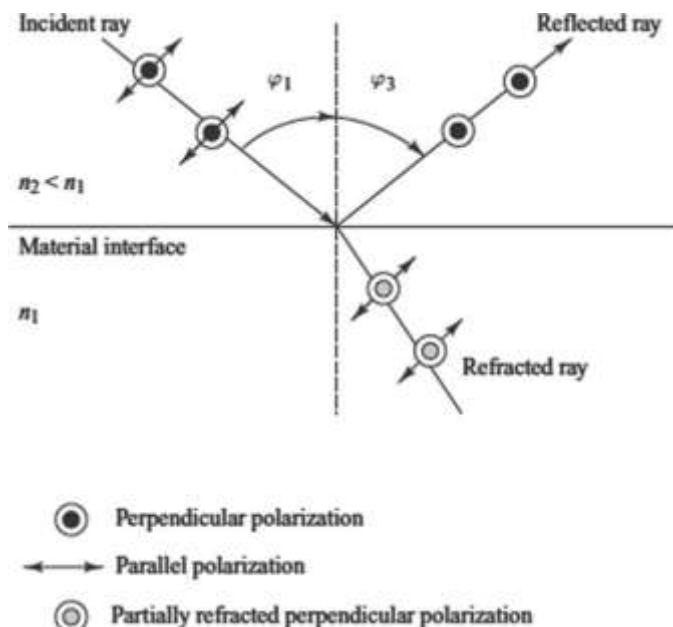


Рисунок 2.10 – Поведінка неполяризованого пучка світла на межі розділу між повітрям і неметалевою поверхнею

Отже, кут Брюстера – це важливе поняття в оптиці, яке стосується поляризації світла, що відбивається. Давайте розглянемо детальніше, як це працює, і як можна визначити кут Брюстера. Кут Брюстера визначається за формулою

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right).$$

У разі падіння світла під кутом Брюстера, відбитий промінь є повністю поляризованим в площині, що перпендикулярна до площини падіння.

У разі відбиття від поверхні:

- паралельна складова (в площині падіння) проходить через матеріал з меншими втратами;
- перпендикулярна складова частково відбивається та частково проходить.

Наведемо приклад програми мовою Python, яка обчислює кут Брюстера для заданих показників заломлення.

```
import math
def brewster_angle(n1, n2):
    # Обчислюємо кут Брюстера в радіанах
    theta_B_radians = math.atan(n2 / n1)

    # Переводимо в градуси
    theta_B_degrees = math.degrees(theta_B_radians)

    return theta_B_degrees
# Приклад використання
if __name__ == "__main__":
    n1 = 1.0 # Показник заломлення повітря
    n2 = 1.5 # Показник заломлення скла

    angle_B = brewster_angle(n1, n2)

    print(f'Кут Брюстера: {angle_B:.2f} градусів')
```

Алгоритм роботи програми:

1. Визначаємо показники заломлення для повітря та скла.
2. Обчислюємо кут Брюстера за формулою, використовуючи арктангенс.

3. Результат виводиться в градусах.

Кут Брюстера: 56.31 градусів

** Process exited - Return Code: 0 **

Press Enter to exit terminal

Кут Брюстера є важливим параметром для оптики та фотоніки, оскільки він визначає умови, за яких світло може бути максимально поляризованим у разі відбиття. Ця концепція має безліч практичних застосунків, охоплюючи фотографію, лазери та оптичні прилади [2].

2.2.4 Поляризаційно-чутливі пристрої

Поляризаційні характеристики світла важливі у процесі вивчення поведінки матеріалів для таких пристроїв, як оптичні ізолятори та світлофільтри. Три поляризаційно-чутливі матеріали або пристрої, які використовуються в таких компонентах: поляризатори, ротатори Фарадея і двозаломлювальні кристали.

Поляризатор – це матеріал або пристрій, який пропускає лише одну складову поляризації і блокує іншу. Наприклад, у випадку, коли неполяризоване світло потрапляє на поляризатор, який має вертикальну вісь пропускання, як показано на рис. 2.11, через пристрій проходить тільки вертикальна складова поляризації. Відомим прикладом цієї концепції є використання поляризаційних сонцезахисних окулярів для зменшення відблисків частково поляризованого сонячного світла, що відбивається від дорожніх або водних поверхонь. Побачити поляризаційну властивість поляризаційних окулярів можна, коли користувач нахилиє голову вбік, то з'являється кілька відблисків. Поляризаційні фільтри в сонцезахисних окулярах блокують поляризоване світло, що надходить від цих відблисків, коли голова тримається нормально.

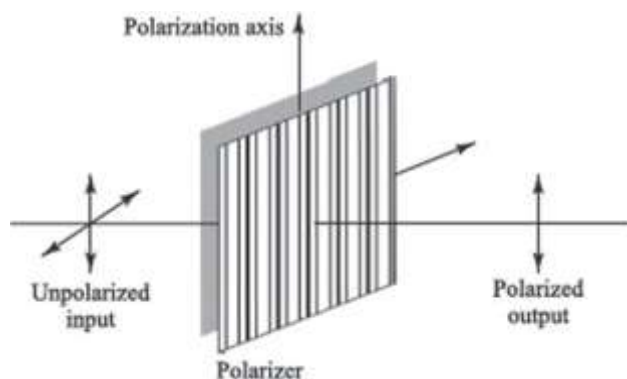


Рисунок 2.11 – Особливість функціонала вертикально орієнтованого поляризатора, який пропускає тільки компонент вертикальної поляризації

Ротатор Фарадея – це пристрій, який повертає стан поляризації (SOP) світла, що проходить через нього, на певну величину. Наприклад, типовий пристрій повертає стан поляризації за годинниковою стрілкою на 45° або на чверть довжини хвилі, як показано на рис. 2.12.

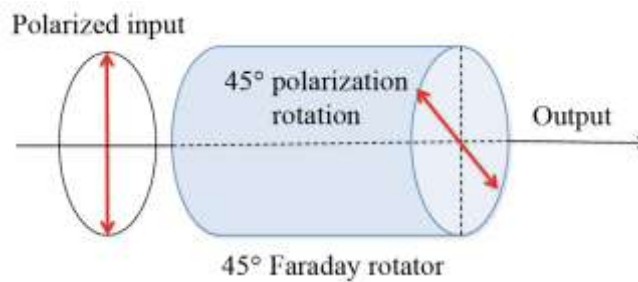


Рисунок 2.12 – Особливість функціонала ротатора Фарадея, який обертає стан поляризації за годинниковою стрілкою на 45° або на чверть довжини хвилі

Це обертання не залежить від стану поляризації вхідного світла, але кут повороту різний залежно від напрямку, в якому світло проходить через пристрій. Тобто, процес обертання не є взаємним. У цьому процесі стан поляризації вхідного світла зберігається після повороту. Наприклад, якщо вхідне світло до ротатора Фарадея з кутом повороту 45° лінійно поляризоване у вертикальному напрямку, то повернене світло, що виходить з кристала, також лінійно поляризоване під кутом 45° . Матеріал ротатора Фарадея зазвичай являє собою асиметричний кристал, такий як ітрієвий залізний гранат (YIG), а ступінь кутового обертання пропорційний товщині пристрою.

Двозаломлювальні або подвійнозаломлювальні кристали мають властивість, яка називається подвійним заломленням. Це означає, що показники заломлення дещо відрізняються вздовж двох перпендикулярних осей кристала, як показано на рис. 2.13.

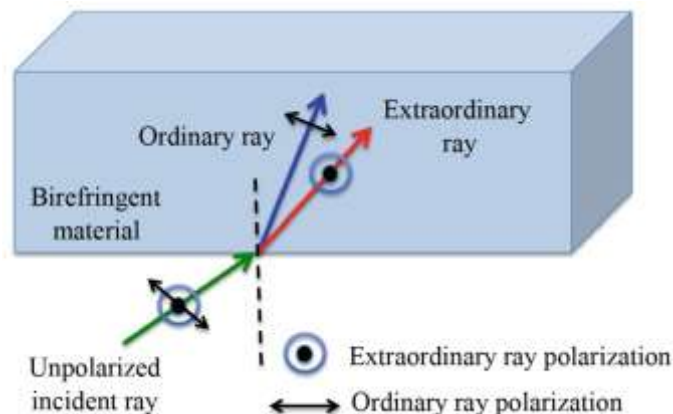


Рисунок 2.13 – Особливість функціонала двозаломлювального кристала, який розщеплює світловий сигнал, що потрапляє на нього, на два перпендикулярно поляризовані пучки

Пристрій, виготовлений з таких матеріалів, відомий як просторовий поляризатор (SWP), що розщеплює світловий сигнал, який надходить на нього, на два ортогонально (перпендикулярно) поляризовані пучки. Один з променів називається звичайним променем або о-променем, оскільки він

підпорядковується закону заломлення Снелла на поверхні кристала. Другий промінь називається незвичайним променем або е-променем, оскільки він заломлюється під кутом, який відхиляється від передбаченої стандартної форми закону Снелла. Кожен з двох ортогональних поляризаційних компонент, таким чином, заломлюється під різним кутом, як показано на рис. 2.13. Наприклад, якщо падаюче неполяризоване світло падає під кутом, перпендикулярним до поверхні пристрою, о-промені можуть пройти прямо через пристрій, тоді як е-промені відхиляються під невеликим кутом, тому вони проходять через матеріал іншим шляхом.

У таблиці 2.2 вказані звичайні індекси n_o і екстраординарні індекси n_e деяких поширених двозаломлювальних кристалів, які використовуються в компонентах оптичного зв'язку, і наведено деякі з їхніх застосунків.

Таблиця 2.2 – Поширені двозаломлювальні кристали та їх застосунки

Crystal name	Symbol	n_o	n_e	Applications
Calcite	CaCO_3	1.658	1.486	Polarization controllers and beamsplitters
Lithium niobate	LiNbO_3	2.286	2.200	Light signal modulators
Rutile	TiO_2	2.616	2.903	Optical isolators and circulators
Yttrium vanadate	YVO_4	1.945	2.149	Optical isolators, circulators, and beam displacers

2.3 Конфігурації та режими оптичних волокон

Спочатку наведено огляд основних концепцій режимів оптичних волокон і конфігурацій оптичних волокон. Підрозділи 2.3–2.7 присвячені звичайним оптичним волокнам, які складаються з твердих діелектричних структур. Підрозділ 2.8 описує структуру фотонних кристалічних волокон, які можуть бути створені з різноманітною внутрішньою мікроструктурою.

2.3.1 Традиційні типи волокон

Оптичне волокно – це діелектричний хвильовід, який працює на оптичних частотах. Цей хвильовід зазвичай має циліндричну форму. Він обмежує електромагнітну енергію у форматі оптичних сигналів в межах своїх поверхонь і спрямовує сигнали в напрямку, паралельному його осі. Передавальні властивості оптичного хвильоводу продиктовані його структурними характеристиками, які мають основний вплив на визначення особливостей розповсюдження оптичного сигналу вздовж волокна. Структура взагалом визначає інформаційну пропускну спроможність волокна, а також впливає на реакцію хвильоводу на різні види збурень навколишнього середовища.

Поширення світла вздовж хвильоводу можна описати в термінах набору спрямованих електромагнітних хвиль, які називаються модами хвильоводу. Ці спрямовані моди називаються зв'язаними або захопленими модами хвильоводу. Кожна спрямована мода – це картина розподілу

електричного і магнітного полів, яка повторюється вздовж волокна через рівні проміжки часу. Лише певна дискретна кількість мод здатна поширюватися вздовж світловоду. Ці моди – це ті електромагнітні хвилі, які задовольняють однорідне хвильове рівняння у волокні та електромагнітне поле в граничних умовах на межі розділу осердя – оболонка хвильоводу.

Хоча в літературі обговорюється багато різних конфігурацій оптичних хвильоводів [4], найбільш поширеною структурою є суцільний діелектричний циліндр радіусом a та показником заломлення n_1 , показаний на рис. 2.14.

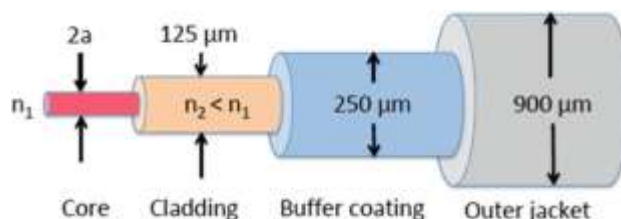


Рисунок 2.14 – Будова волокна з показником заломлення $n_2 < n_1$

Осердя – це центральна частина оптоволоконного кабеля, яка складається з матеріалу з високим показником заломлення n_1 . Осердя ОВ забезпечує основну функцію передачі світла. Світло, яке вводиться в осердя, утримується всередині волокна завдяки явищу повного внутрішнього відбиття, яке відбувається на межі між осердям і оболонкою. Оболонка – це зовнішня частина волокна, виготовлена з діелектричного матеріалу з показником заломлення n_2 , який менший за n_1 . Оболонка виконує кілька важливих функцій:

- забезпечення повного внутрішнього відбиття завдяки різниці в показниках заломлення між осердям і оболонкою; світло, яке потрапляє на межу, відбивається назад в осердя, що дозволяє сигналу поширюватися вздовж волокна;
- оболонка допомагає зменшити розсіювання втрат, які можуть виникати через дефекти або забруднення на поверхні осердя;
- оболонка забезпечує додаткову механічну підтримку, захищаючи осердя від механічних пошкоджень;
- оболонка заважає забрудненням потрапляти на поверхню осердя, що може призвести до поглинання світла і втрат сигналу.

Ефективність передачі світла в оптоволокні залежить від якості виготовлення як осердя, так і оболонки. Відповідний вибір матеріалів дозволяє мінімізувати втрати сигналу і забезпечити стабільну передачу інформації на великі відстані. Волоконно-оптичні технології використовують комбінацію осердя і оболонки для досягнення високої ефективності передачі світла. Ця конструкція є основою для сучасних систем зв'язку, які забезпечують швидкісну передачу даних, що є важливим елементом сучасної комунікаційної інфраструктури.

Осердя виготовляється з високочистого діоксиду кремнію (SiO_2), що забезпечує високу прозорість та мінімальні втрати світла. Найпоширеніші розміри осердя: 9 мкм для монорежимних волокон та 50 мкм для мультирежимних волокон. Розмір осердя впливає на кількість світлових режимів, які можуть проходити через волокно. Стандартний діаметр оболонки становить 125 мкм. Вона має нижчий показник заломлення, ніж осердя, що дозволяє світлу залишатись в осерді завдяки явищу тотального внутрішнього відбиття. Волокна з пластиковим осердям і оболонкою зазвичай мають вищі втрати, але їх перевага полягає в легкості та гнучкості, що робить їх корисними для певних умов використання, наприклад, у побутових або промислових застосунках. Буферним покриттям є еластичне, стійке до пошкоджень пластикове покриття, що забезпечує механічний захист волокна від таких зовнішніх впливів, як удари або вигини. Зовнішня оболонка з діаметром 250 мкм або 900 мкм надає додаткову міцність і захист, а також ізолює волокна від зовнішніх умов. Втрати на розсіювання виникають через мікроскопічні вигини волокна, які можуть бути викликані механічними навантаженнями або нерівностями під час монтажу. Ці вигини можуть призводити до втрати світла, що проходить через волокно. Використання буферного покриття та зовнішньої оболонки допомагає зменшити ці втрати, забезпечуючи стабільність при прокладанні та експлуатації волокон.

Оптичні волокна широко використовуються в різних сферах:

- для передачі даних на великі відстані з високою швидкістю;
- у разі ендоскопії та в інших медичних пристроях;
- у системах відеоспостереження та сигналізації.

Варіації в матеріальному складі осердя призводять до появи двох типів волокон, показаних на рис. 2.15.

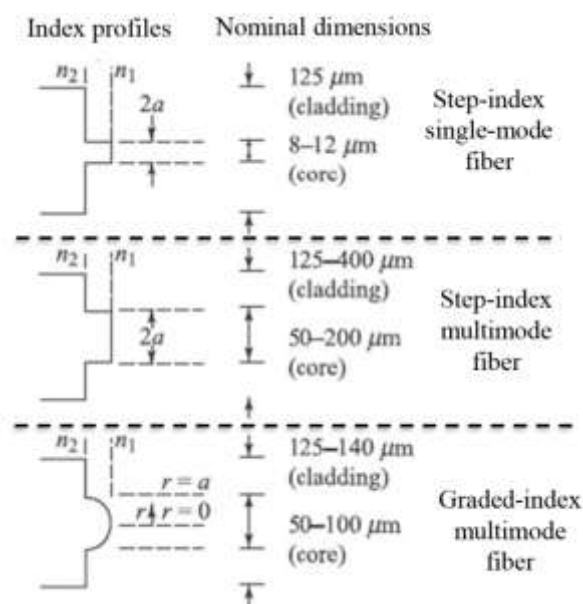


Рисунок 2.15 – Порівняння звичайного одномодового та багатомодового ступінчастого і градієнтного оптичних волокон

У першому випадку, ступінчастий показник заломлення осердя однорідний по всій довжині і зазнає різкої зміни (або стрибка) на межі оболонки. В іншому випадку, показаному в нижній частині рис. 2.15, показник заломлення осердя змінюється залежно від радіальної відстані від центра волокна. Цей тип є волокном із градієнтним показником заломлення.

Волокна зі ступінчастим і градієнтним індексом можна розділити на одномодові і багатомодові. Як випливає з назви, одномодове волокно підтримує тільки один режим поширення, тоді як багатомодові волокна містять множину режимів. Кілька типових розмірів одномодових і багатомодових волокон наведені на рис. 2.15, щоб дати уявлення про розмірну шкалу. Багатомодові волокна мають низку переваг порівняно з одномодовими. Розглянемо ці переваги детальніше. Завдяки більшому діаметру осердя (зазвичай 50 мкм або більше) багатомодові волокна легше інтегрувати в оптичні системи. Це спрощує процес введення світла у волокно, оскільки більше світлових режимів можуть потрапити в осердя. Завдяки більшій площі перерізу осердя, з'єднання між багатомодовими волокнами є простішими і менш критичними щодо точності, що може зменшити витрати на монтаж та обслуговування. Багатомодові волокна можуть бути збуджені світлодіодами, які є дешевшими у виробництві, простішими в експлуатації і мають довший термін служби порівняно з лазерними діодами, які, зазвичай, використовуються для одномодових волокон. Світлодіоди також забезпечують достатню потужність для коротших відстаней, що робить їх ідеальними для локальних мереж й інших застосувань, де не потрібна велика дальність передачі. Використання світлодіодів дозволяє спростити оптичні системи, оскільки вони не вимагають складних схем для модуляції і стабілізації, що може знизити загальні витрати на систему. Багатомодові волокна часто використовуються в локальних мережах, системах зв'язку в будівлях, промислових застосунках, а також у відеоспостереженні, де не потрібно великих відстаней, але потрібна висока пропускна здатність. Незважаючи на всі переваги, важливо також зауважити, що багатомодові волокна мають деякі недоліки, такі як більші втрати сигналу на великих відстанях через дисперсію мод, що може обмежувати їх використання в довгих лініях зв'язку. Таким чином, вибір між багатомодовими і одномодовими волокнами залежить від конкретних вимог до системи, включаючи відстань, бюджет, тип використовуваних джерел світла та інші фактори.

Коли оптичний імпульс вводиться в багатомодове волокно, він розподіляється між кількома модами. Оскільки кожна мода має свою власну швидкість поширення через осердя, імпульс розтягується в часі, коли проходить через волокно. Це розширення імпульсу викликане різними шляхами, які проходять моди, і різними швидкостями, з якими вони рухаються. Міжмодова дисперсія обмежує максимальну пропускну

спроможність багатомодових волокон, особливо на великих відстанях. Зі збільшенням відстані імпульси розтягуються ще більше, що ускладнює розрізнення між ними і може призвести до зниження якості сигналу. Волокна з градієнтним індексом мають змінний показник заломлення, що дозволяє модам рухатися з різними швидкостями, але зменшує різницю між ними. Це забезпечує більш однорідне поширення імпульсів і зменшує міжмодову дисперсію. Такі волокна зазвичай забезпечують вищу пропускну спроможність і кращу якість сигналу порівняно з волокнами зі ступінчастим індексом. Одномодові волокна мають лише одну моду, що усуває міжмодову дисперсію. Це дозволяє їм досягати значно більших відстаней з високою швидкістю передачі даних, не зазнаючи значних втрат сигналу через дисперсію. Одномодові волокна є кращим вибором для довгих дистанцій і високих швидкостей, тоді як мультирежимні волокна з градієнтним індексом можуть бути більш економічно ефективними для коротших відстаней [11].

2.3.2 Поняття променів та режимів

Оптичні моди – це специфічні конфігурації електромагнітного поля, які можуть розповсюджуватися в оптичному волокні. Кожна мода характеризується певною формою розподілу поля та енергетичною конфігурацією. У монорежимних волокнах, які мають мале осердя (близько 9 мкм), може проходити лише одна мода. Це дозволяє зменшити дисперсію сигналу і втрати, що робить їх ідеальними для довгих дистанцій передачі. У мультирежимних волокнах (з осердям близько 50 мкм) можуть проходити кілька мод. Це створює можливість для передачі даних на коротші відстані, але призводить до дисперсії, оскільки різні моди можуть мати різну швидкість поширення. Коли світловий імпульс вводиться в оптичне волокно, він може бути поданим як суперпозиція кількох мод. Це означає, що імпульс може мати різні компоненти, які взаємодіють й інтерферують один з одним, формуючи складніші поля. Кожна з мод має свій власний розподіл електромагнітного поля, яке можна описати математично за допомогою хвильових рівнянь. Поле може мати різну амплітуду, частоту і фазу, що визначає поведінку світлового сигналу. Розуміння мод у волокнах є важливим для проектування оптичних систем, оскільки це дозволяє оптимізувати передачу даних, зменшуючи втрати та покращуючи якість сигналу. Ці концепції є основою для проектування та аналізу оптичних волокон, а також їх застосування в сучасних телекомунікаційних системах. Для монохроматичного світлового променя з радіанною частотою ω , мода, що рухається в додатному напрямку z (тобто вздовж осі волокна), має залежність від часу t і z , має вигляд

$$e^{j(\omega t - \beta z)}$$

Коефіцієнт β є z -компонентою постійної поширення хвилі $k = 2\pi/\lambda$ і є основним параметром, що цікавить нас при описі мод у волокні. Для

напрямлених мод β може набувати лише певних дискретних значень, які визначаються з умови, що поле моди має задовольняти рівняння Максвелла, а також електричне та магнітне поля граничних умов на межі розділу активна зона – оболонка.

Іншим методом теоретичного дослідження характеристик поширення світла в оптичному волокні є геометрична оптика або метод трасування променів. Геометрична оптика ґрунтується на припущенні, що світло можна моделювати як промені, які поширюються в просторі. Цей підхід особливо корисний, коли розміри об'єктів (в даному випадку, волокна) значно більші за довжину хвилі світла. Коли відношення радіуса осердя волокна до довжини хвилі світла велике, метод трасування променів забезпечує добрі результати. Це особливо актуально для мультирежимних волокон, де кількість напрямлених мод велика. Метод дозволяє зрозуміти, як світло взаємодіє з волокном, зокрема, як промені світла відбиваються та заломлюються. Це робить його корисним для розробки та оптимізації оптичних систем. Порівняно з електромагнітним модальним аналізом, який може бути складним і вимагати великих обчислювальних ресурсів, променевий метод є більш інтуїтивним та легшим у використанні. Хоча променевий підхід є потужним інструментом, він не завжди враховує всі ефекти, які можуть виникати при поширенні світла, особливо в умовах, коли розміри волокна порівнянні з довжиною хвилі. У таких випадках електромагнітний хвильовий аналіз може бути більш точним. Метод трасування променів широко використовується для:

- проєктування таких оптичних систем, як лазери та оптичні комутатори;
- аналізу втрат сигналу та характеристики розповсюдження в оптичних волокнах;
- оптимізації геометрії волокон для покращення їх ефективності.

У контексті оптичних волокон мода визначає спосіб, яким світло поширюється через волокно. Вона описує просторові розподіли електричних і магнітних полів світлової хвилі у волокні. Кожна мода має свій характерний профіль амплітуди та фази. Кожна робоча мода може бути розкладена на множину плоских хвиль, які накладаються одна на одну. Ці плоскі хвилі рухаються в напрямку осі волокна (в напрямку z), утворюючи стоячу хвилю в поперечному напрямку (перпендикулярно до осі волокна). Група плоских хвиль, що відповідає певній моді, утворює набір променів, які називаються конгруентністю променя. Кожен промінь у цій конгруентній множині рухається під однаковим кутом відносно осі волокна. Оскільки мода є дискретною, кількість можливих променів (або напрямків) також обмежена. Це означає, що існує фіксована кількість можливих напрямків, в яких світло може поширюватися у волокні. Для монорежимних волокон існує лише одна робоча мода, що означає, що світло рухається лише в одному напрямку. У мультирежимних волокнах може бути декілька мод, що дозволяє світлу поширюватися під різними

кутами. Кожна мода має свої власні характеристики, такі як швидкість поширення та затримка, що впливають на загальну продуктивність системи передачі даних. Таким чином, зв'язок між світловим променем і модою в оптичних волокнах є суттєвим для розуміння того, як світло передається через волокно. Це знання є критично важливим для проектування та оптимізації оптичних систем. Важливо відзначити, що, оскільки у волокні існує лише певна кількість M дискретних напрямлених мод, то можливі кути збігу променів, що відповідають цим режимам, також обмежені тим же числом M .

Незважаючи на корисність методу наближеної геометричної оптики, існує низка обмежень і розбіжностей між ним і точним модальним аналізом. У випадку одномодових волокон, де світло передається лише одним модом, точний модальний аналіз є критично важливим. Це дозволяє точно враховувати електромагнітні властивості хвилі, які можуть бути суттєво спотворені у процесі використання геометричних наближень. Такі явища когерентності, як інтерференція, потребують точного розуміння електромагнітних полів. Наближена геометрична оптика не може адекватно описати ці явища, оскільки вона не враховує взаємодію хвиль на рівні амплітуд і фаз. Модальний аналіз дозволяє детально вивчати розподіл електромагнітного поля для кожної окремої моди. Це важливо для таких застосувань, як:

- збудження окремих мод, коли потрібно контролювати активність певної моди для досягнення бажаних характеристик передачі;
- у випадках, коли є недосконалості в структурі хвилеводу, що можуть призводити до перенесення енергії між різними модами.

Використання електромагнітної теорії забезпечує точніший опис поведінки світла в оптичних волокнах, зокрема в умовах, де наближена геометрична оптика може дати значні помилки. У таких галузях, як волоконна оптика, фотоніка та лазерні технології, точний модальний аналіз є необхідним для проектування ефективних систем і пристроїв. Таким чином, хоча наближена геометрична оптика є корисним методом для багатьох застосувань, у випадках, коли важливі деталі, пов'язані з електромагнітними властивостями, модальним аналізом та когерентністю, потрібно використовувати більш точні підходи.

Інша розбіжність між підходом променевої оптики і модальним аналізом виникає, коли оптичне волокно рівномірно вигнуте з постійним радіусом кривизни. У рамках променевої оптики світло моделюється як пучок променів, які рухаються по прямолінійних траєкторіях. Коли мова йде про вигнуте волокно, променева оптика може недооцінювати вплив вигинів на розподіл світла. Вона може передбачити, що деякі промені, які проходять через вигнуту частину волокна, зазнають повного внутрішнього відбиття, тобто залишаються в осерді без втрат. Це не враховує реальність, що внаслідок вигинів відбувається випромінювання частини енергії. Хвильова оптика, з іншого боку, враховує природу світлових хвиль та їх

взаємодію з матеріалом волокна. Вона правильно передбачає, що при вигині волокна кожна мода зазнає певних втрат випромінювання. Це пов'язано з тим, що при вигині змінюється кут падіння світла на межі між осердям і оболонкою, що може призвести до часткового виходу світла за межі осердя. У вигнутому волокні частина світла може виходити з осердя через мікроскопічні вигини, що призводить до втрат сигналу. Ці втрати можуть бути значними, особливо при малих радіусах вигину. Модальний аналіз дозволяє вивчити, як різні моди світла (світлові хвилі) розповсюджуються в оптичному волокні та як вони реагують на зміни в геометрії волокна, охоплюючи вигини. Це допомагає точніше прогнозувати поведінку світла в реальних умовах. Таким чином, підхід хвильової оптики є більш точним для аналізу поведінки світла в оптичних волокнах, особливо в умовах вигинів, оскільки він враховує взаємодію хвиль та їх втрати, в той час як променева оптика може давати спрощені і, в деяких випадках, помилкові результати.

2.3.3 Структура волокон зі ступінчастим індексом

Для обговорення поширення світла в оптичному хвилеводі, спочатку розглянемо ступінчасте волокно, зображене на рис. 2.15. У телекомунікаційних ступінчастих скляних волокнах осердя радіусом a має показник заломлення n_1 , який, зазвичай, дорівнює 1,48. Воно оточене оболонкою з дещо нижчим показником n_2 , де

$$n_2 = n_1(1 - \Delta). \quad (2.20)$$

Цей параметр Δ називається різницею індексів осердя та оболонки або просто різницею індексів. Значення n_2 вибирається таким чином, щоб номінально становити 1–3% для багатомодових волокон і від 0,2 до 1,0% для одномодових волокон. Оскільки показник заломлення осердя більший за показник заломлення оболонки, електромагнітна енергія на оптичних частотах буде поширюватися вздовж волоконного хвилеводу завдяки внутрішньому відбиттю на межі розділу осердя і оболонки.

2.3.4 Подання променевої оптики

Оскільки розмір осердя багатомодових волокон набагато більший за довжину хвилі оптичного сигналу, що передається (яка становить приблизно 1 мкм), інтуїтивно зрозуміла картина механізму поширення в ідеальному багатомодовому оптичному хвилеводі зі ступінчастим індексом, яку найбільш легко побачити за допомогою простого променевого (геометричного) подання оптики [6–11]. Для спрощення в цьому аналізі розглядатиметься лише окремий промінь, що належить до променевої конгруенції, яка є представником волоконної моди. Існує два типи променів, які можуть поширюватися у волокні, це меридіальні промені і косі промені. Меридіальні промені розташовані в площині, що проходить через вісь симетрії осердя волокна. Це означає, що вони завжди

залишаються в одній площині, що робить їх траєкторії легшими для аналізу.

Класи меридіальних променів:

- зв'язані промені залишаються в осерді та поширюються уздовж волокна, підкоряючись законам геометричної оптики. Вони відбиваються від межі між осердям і оболонкою, забезпечуючи ефективну передачу світла;

- незв'язані промені можуть заломлюватися поза осердям, тобто не залишаються в межах осердя, що може призводити до втрат сигналу, якщо вони не відбиваються назад у волокно.

Викривлені промені не обмежуються однією площиною, а рухаються по гвинтовій траєкторії вздовж волокна. Це означає, що вони можуть мати складніші траєкторії, які залежать від умов використання та геометрії волокна. Викривлені промені можуть бути важливими у мультирежимних волокнах, оскільки їх присутність може призвести до дисперсії і, як наслідок, до зниження якості сигналу на великих відстанях. Розуміння різних типів променів і їх поведінки в оптичному волокні є критично важливим для оптимізації систем передачі даних. Це знання допомагає інженерам проектувати волокна з урахуванням зменшення втрат сигналу та підвищення ефективності передачі. Отже, викривлені промені не обмежуються однією площиною, а мають тенденцію рухатися по гвинтовій траєкторії вздовж волокна, як показано на рис. 2.16.

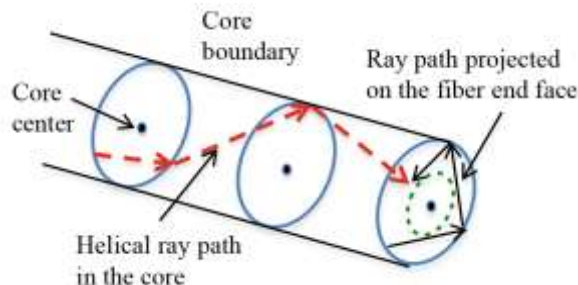


Рисунок 2.16 – Променеве подання косих променів, що рухаються в осерді оптичного волокна зі ступінчастим індексом

В оптичних волокнах різні типи променів поширюються по-різному, залежно від їхнього кута нахилу відносно осі волокна. Промені, які рухаються вздовж осі волокна (меридіальні промені), простіше аналізувати, оскільки вони лежать в одній площині і їхні властивості добре описуються геометричною оптикою. Проте більшість робочих променів у волокні має гострий кут нахилу, що робить їхній аналіз складнішим і потребує врахування додаткових факторів.

Косі промені, або промені витоку, частково обмежуються осердям оптичного волокна і поступово згасають через витоки енергії, що не можуть бути повністю описані теорією чистих променів. Для точнішого аналізу втрат потужності, спричинених цими променями, потрібно

використовувати теорію мод. Теорія мод враховує хвильові властивості світла і дозволяє детальніше описати поведінку променів, зокрема втрати випромінювання від променів витoku. Знання про поведінку косих променів має важливе значення для розрахунку світло-приймальної спроможності волокна та визначення втрат потужності світла, що поширюється у волокні. Ігнорування цих факторів може призвести до неточностей у прогнозах ефективності оптичного волокна, особливо в системах, де важлива висока точність та ефективність передачі світла.

Меридіальний промінь показаний на рис. 2.17, для волокна зі ступінчастим індексом.

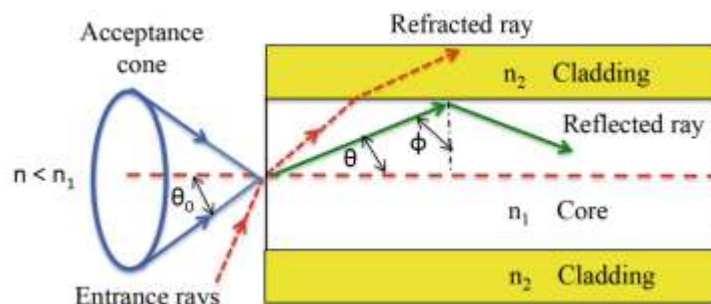


Рисунок 2.17 – Механізм поширення сигналів в ідеальному ступінчастому оптичному хвилеводі на основі променевої оптики

Світловий промінь входить до осердя волокна з середовища з показником заломлення n під кутом θ_0 відносно осі волокна і падає на межу розділу осердя – оболонка під нормальним кутом ϕ . Якщо він падає на цю межу розділу під таким кутом, що він повністю відбивається всередину, то меридіальний промінь рухається по зигзагоподібній траєкторії вздовж осердя волокна, проходячи через вісь хвилеводу після кожного відбиття. З закону Снела випливає, що мінімальний або критичний кут ϕ_c , який підтримує повне внутрішнє відбиття для меридіального променя має вигляд

$$\sin \phi_c = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2.21)$$

Промені, що падають на межу розділу активної зони та оболонки під кутами, меншими за ϕ_c , заломлюються від активної зони і втрачаються в оболонці, як показано пунктирною лінією. Застосовуючи закон Снела до межі повітря – волокно, умову рівняння (2.21) можна пов'язати з максимальним вхідним кутом $\theta_{0,max}$, який називається кутом приймання θ_A , через співвідношення

$$n \sin \theta_{0,max} = n \sin \theta_A = n_1 \sin \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}, \quad (2.22)$$

де $\theta_c = \pi/2 - \phi_c$.

Таким чином, ті промені, що мають вхідні кути θ_0 менші за θ_A , будуть повністю внутрішньо відбиватися на межі розділу осердя – оболонка. Таким чином, θ_A визначає приймальний конус для оптичного волокна. Рівняння (2.22) також визначає числову апертуру (NA) волокна зі ступінчастим індексом для меридіальних променів.

$$NA = n \sin \theta_A = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}. \quad (2.23)$$

Наближення в правій частині справедливе для типового випадку, коли значення Δ , що визначається рівнянням (2.20), набагато менше 1. Оскільки числова апертура пов'язана з кутом прийняття, вона зазвичай використовується для опису світло-приймальної техніки або збирання потужності оптичних сигналів у волокні і для розрахунку коефіцієнта ефективності оптичного з'єднання «джерело-волокно». Числова апертура – це безрозмірна величина, менша за одиницю, зі значеннями, як правило, в діапазоні від 0,14 до 0,50.

Приклад 2.5 Розглянемо багатомодове кремнеземне волокно з показником заломлення осердя $n_1 = 1,480$ і показник заломлення оболонки $n_2 = 1,460$. Знайти (а) критичний кут, (б) числову апертуру та (с) прийнятний кут.

Розв'язання

(а) З рівняння (2.21) критичний кут визначається як

$$\varphi_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} = \sin^{-1} \frac{1.460}{1.480} = 80.5^\circ.$$

(б) З рівняння (2.23) числова апертура дорівнює

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = 0.242.$$

(с) З рівняння (2.22) кут приймання в повітрі ($n = 1.00$) становить

$$\theta_A = \sin^{-1} NA = \sin^{-1} 0.242 = 14^\circ.$$

Наведемо приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого визначення (для багатомодового волокна) значення критичного кута, числової апертури та кута приймання сигналу. Отже, щоб визначити критичний кут, числову апертуру та кут приймання сигналу для багатомодового волокна, нам потрібно знати деякі основні параметри волокна, такі як показники заломлення осердя (n_{core}) і оболонки (n_{cladding}). Давайте реалізуємо ці розрахунки на Python:

```
import math
def calculate_critical_angle(n_core, n_cladding):
```

```

"""Calculate the critical angle for total internal reflection."""
if n_core <= n_cladding:
    raise ValueError("The core's refractive index must be greater than the
cladding's refractive index.")
return math.degrees(math.asin(n_cladding / n_core))
def calculate_numerical_aperture(n_core, n_cladding):
    """Calculate the numerical aperture of the optical fiber."""
    return math.sqrt(n_core ** 2 - n_cladding ** 2)
def calculate_acceptance_angle(numerical_aperture):
    """Calculate the acceptance angle of the optical fiber."""
    return math.degrees(math.asin(numerical_aperture))
# Example parameters
n_core = 1.48 # Refractive index of the core
n_cladding = 1.46 # Refractive index of the cladding
# Calculate critical angle
critical_angle = calculate_critical_angle(n_core, n_cladding)
print(f"Critical Angle: {critical_angle:.2f} degrees")
# Calculate numerical aperture
numerical_aperture = calculate_numerical_aperture(n_core, n_cladding)
print(f"Numerical Aperture: {numerical_aperture:.2f}")
# Calculate acceptance angle
acceptance_angle = calculate_acceptance_angle(numerical_aperture)
print(f"Acceptance Angle: {acceptance_angle:.2f} degrees")

```

Пояснення:

1. Критичний кут – це кут падіння, при якому світло починає повністю відбиватися всередині осердя і не виходить в оболонку.;
2. Числова апертура (NA) – параметр, що характеризує спроможність волокна приймати світло;
3. Кут приймання сигналу – максимальний кут, при якому світло може входити у волокно і повністю відбиватися всередині.

У прикладі ми використовуємо функції для розрахунку кожного з цих параметрів і виводимо результати для заданих значень показників заломлення. Цей підхід дозволяє легко змінювати вхідні параметри та аналізувати результати для різних оптичних волокон.

Приклад 2.6 Розглянемо багатомодове волокно з показником заломлення осердя 1,480 і різницею показників заломлення осердя та оболонки 2,0% ($\Delta = 0,020$). Знайти (а) числову апертуру, (б) кут приймання і (с) критичний кут.

Розв'язання. З рівняння (2.20) випливає, що показник покриття становить $n_2 = n_1 (1 - \Delta) = 1.480(0.980) = 1.450$.

(а) Використовуючи рівняння (2.23), чисельна апертура дорівнює

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta} = 1.480 \sqrt{0.04} = 0.296.$$

(b) Використовуючи рівняння (2.22), кут приймання в повітрі ($n = 1.00$) становить

$$\theta_A = \sin^{-1} NA = \sin^{-1} 0.296 = 17.2^\circ.$$

(c) З рівняння (2.21) випливає, що критичний кут на межі розділу активної зони та оболонки дорівнює

$$\varphi_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} = \sin^{-1} 0.980 = 78.5^\circ.$$

Наведемо приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого визначення (для багатомодового волокна) значення критичного кута, числової апертури та кута приймання сигналу.

```
import math
def calculate_critical_angle(n_core, n_cladding):
    """Calculate the critical angle for total internal reflection."""
    if n_core <= n_cladding:
        raise ValueError("The core's refractive index must be greater than the cladding's refractive index.")
    return math.degrees(math.asin(n_cladding / n_core))
def calculate_numerical_aperture(n_core, n_cladding):
    """Calculate the numerical aperture of the optical fiber."""
    return math.sqrt(n_core ** 2 - n_cladding ** 2)
def calculate_acceptance_angle(numerical_aperture):
    """Calculate the acceptance angle of the optical fiber."""
    return math.degrees(math.asin(numerical_aperture))
# Given parameters
n_core = 1.48 # Refractive index of the core
delta_percentage = 2.0 # Difference in refractive indices in percentage
# Calculate the refractive index of the cladding
n_cladding = n_core * (1 - delta_percentage / 100)
# Calculate critical angle
critical_angle = calculate_critical_angle(n_core, n_cladding)
print(f"Critical Angle: {critical_angle:.2f} degrees")
# Calculate numerical aperture
numerical_aperture = calculate_numerical_aperture(n_core, n_cladding)
print(f"Numerical Aperture: {numerical_aperture:.2f}")
# Calculate acceptance angle
acceptance_angle = calculate_acceptance_angle(numerical_aperture)
print(f"Acceptance Angle: {acceptance_angle:.2f} degrees")
```

Пояснення:

- показник заломлення оболонки обчислюється на основі різниці у відсотках між показниками заломлення осердя і оболонки;
- критичний кут розраховується за допомогою функції ``calculate_critical_angle``, яка використовує відомий показник заломлення осердя та обчислений показник заломлення оболонки;
- числова апертура (NA) розраховується функцією ``calculate_numerical_aperture``;
- кут приймання сигналу розраховується функцією ``calculate_acceptance_angle``.

Цей код дозволяє ввести параметри оптичного волокна та отримати значення критичного кута, числової апертури та кута приймання сигналу, що є важливими характеристиками для аналізу роботи волоконно-оптичних систем.

Приклад 2.7 Розглянемо межу розділу між волоконним осердям та матеріалом оболонки, які мають показники заломлення n_1 та n_2 відповідно. Якщо n_2 менший за n_1 на 1% і $n_1 = 1,450$, покажіть, що $n_2 = 1,435$. Покажіть, що критичний кут становить $\phi_c = 81,9^\circ$.

Наведемо приклад програми мовою Python, яка розраховує показник заломлення оболонки та критичний кут для багатомодового волокна з заданими параметрами.

```
import math
def calculate_cladding_and_critical_angle(n_core, difference_percentage):
    # Розрахунок показника заломлення оболонки
    n_cladding = n_core - (n_core * difference_percentage)
    # Розрахунок критичного кута (в радіанах)
    critical_angle_radians = math.asin(n_cladding / n_core)
    # Переведення критичного кута в градуси
    critical_angle_degrees = math.degrees(critical_angle_radians)
    return n_cladding, critical_angle_degrees
# Вхідні дані
n_core = 1.45 # Показник заломлення осердя
difference_percentage = 1.0 / 100 # Різниця між показниками заломлення (1.0%)
# Виклик функції для розрахунку
n_cladding, critical_angle = calculate_cladding_and_critical_angle(n_core, difference_percentage)
# Виведення результатів
print(f"Показник заломлення оболонки: {n_cladding:.4f}")
print(f"Критичний кут: {critical_angle:.4f} градусів")
```

Запустивши програму отримаємо такі результати,
 Показник заломлення оболонки: 1.4355
 Критичний кут: 81.8904 градусів
 ** Process exited - Return Code: 0 **
 Press Enter to exit terminal

Ця програма дозволяє швидко отримати потрібні значення для багатомодового волокна з заданими параметрами.

2.3.5 Оптичні хвилі у хвилеводі з діелектричної пластини

З рис. 2.17 видно, що теорія променів дозволяє променям під будь-яким кутом ϕ , більшим за критичний кут ϕ_c , поширюватися вздовж волокна. Однак, якщо взяти до уваги ефект інтерференції через фазу плоскої хвилі, пов'язаної з променем, то видно, що тільки хвилі під певними дискретними кутами, більшими або рівними ϕ_c , здатні поширюватися вздовж волокна. Щоб побачити це, розглянемо поширення хвилі у нескінченному хвилеводі з діелектричної пластини товщиною d . Її показник заломлення n_1 більший за показник n_2 матеріалу над і під пластиною. Таким чином, хвиля буде поширюватись у цьому хвилеводі шляхом багаторазових відбиттів за умови, що кут падіння відносно верхньої і нижньої поверхні задовольняє умову, наведену в рівнянні (2.22).

На рис. 2.18 показано геометрію хвиль, що відбиваються від поверхні розділу матеріалів. Тут спочатку розглянемо два промені, позначені променем 1 і променем 2, які асоціюються з однією і тією ж хвилею. Промені падають на межу поділу матеріалів під кутом $\theta < \theta_c = \pi/2 - \phi_c$. На рис. 2.18 суцільні лінії позначають шляхи променів, а пунктирні лінії показують їхні пов'язані з ними фронти з постійною фазою.

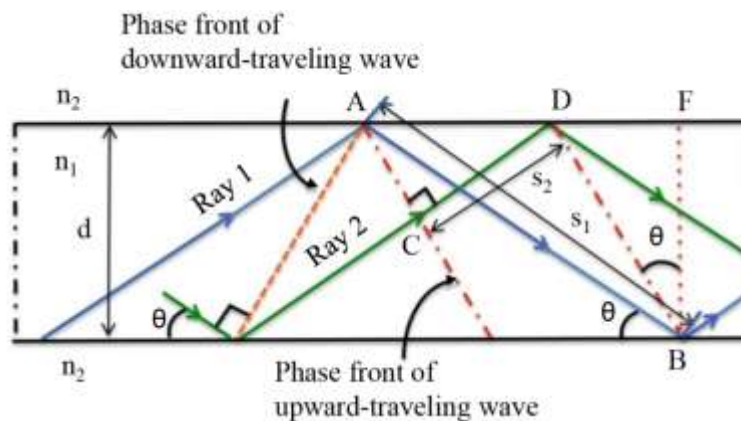


Рисунок 2.18 – Механізм поширення сигналів вздовж плоского волоконного хвилеводу

Необхідна умова для поширення хвиль у діелектричній пластині полягає в тому, що всі точки на одному фазовому фронті плоскої хвилі мають бути синфазними. Це означає, що зміна фази, яка відбувається в

промені 1 при переході з точки А в точку В, мінус зміна фази в промені 2 між точками С і D має відрізнятись на ціле число, кратне 2π .

Оскільки хвиля проходить через матеріал, вона зазнає фазового зсуву який визначається формулою

$$\Delta = k_1 s = n_1 k s = n_1 2\pi s / \lambda ,$$

де k_1 – стала поширення в середовищі з показником заломлення n_1

$k = k_1/n_1$ – стала поширення у вільному просторі;

s – відстань, яку пройшла хвиля в матеріалі.

Фаза хвилі змінюється не тільки під час проходження хвилі, але й при відбитті від межі поділу діелектриків. Переходячи з точки А в точку В, промінь 1 проходить у матеріалі відстань $s_1 = d/\sin \theta$ і зазнає двох фазових змін δ у точках відбиття. Промінь 2 не зазнає жодних відбивань при переході з точки С в точку D. Щоб визначити зміну його фази, спочатку зауважимо, що відстань від точки А до точки D дорівнює $AD = AF - DF = (d/\tan \theta) - d \tan \theta$. Таким чином, відстань між точками С і D дорівнює

Тоді вимога до поширення хвилі може бути записана як

$$\frac{2\pi n_1}{\lambda} (s_1 - s_2) + 2\delta = 2\pi m , \quad (2.24, a)$$

де $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Підставивши вирази для s_1 та s_2 у рівняння (2.24, а), отримаємо

$$\frac{2\pi n_1}{\lambda} \left\{ \frac{d}{\sin \theta} - \left[\frac{(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) d}{\sin \theta} \right] \right\} + 2\delta = 2\pi m , \quad (2.24, b)$$

цю формулу можна звести до вигляду

$$\frac{2\pi n_1 d \sin \theta}{\lambda} + \delta = \pi m . \quad (2.24, c)$$

Розглядаючи тільки електричні хвилі з компонентами, нормальними до площини падіння, з рівняння (2.19, а) випливає, що фазовий зсув при відбитті дорівнює

$$\delta = -2 \arctan \left[\frac{\sqrt{\cos^2 \theta - (n_2^2/n_1^2)}}{\sin \theta} \right] . \quad (2.25)$$

Від’ємний знак тут потрібен тому, що хвиля в середовищі має бути згасною, а не такою, що зростає. Підставивши цей вираз у рівняння (2.24, с), отримаємо

$$\frac{2\pi n_1 d \sin \theta}{\lambda} - \pi m = 2 \arctan \left[\frac{\sqrt{\cos^2 \theta - (n_2^2/n_1^2)}}{\sin \theta} \right], \quad (2.26, a)$$

або

$$\tan \left(\frac{\pi n_1 d \sin \theta}{\lambda} - \frac{\pi m}{2} \right) = \left[\frac{\sqrt{n_1^2 \cos^2 \theta - n_2^2}}{n_1 \sin \theta} \right]. \quad (2.26, b)$$

Таким чином, тільки хвилі, які мають кути θ , що задовольняють умову в рівнянні (2.26) будуть поширюватися у хвилеводі з діелектричної пластини.

2.4 Режими в круглих хвилеводах

Для детального розуміння розповсюдження оптичної потужності у волоконно-оптичних системах потрібно розв’язати рівняння Максвелла в циліндричних координатах, враховуючи межу між осердям і оболонкою волокна. Для хвилеводів з діелектричним осердям і оболонкою, розв’язання рівнянь Максвелла з граничними умовами призводить до характеристичного рівняння. У волоконно-оптичних хвилеводах розрізняють кілька типів мод:

- HE (гібридні електричні);
- EH (гібридні магнітні);
- TE (поперечно-електричні);
- TM (поперечно-магнітні).

Основні моди для кругового волокна зазвичай позначаються як LP (Linearly Polarized), які є суперпозицією HE і EH мод. Після знаходження характеристичних рівнянь можна знайти розподіл інтенсивності електричного і магнітного полів у волокні. Числова апертура (NA) і дисперсійні властивості волокна визначають можливість розповсюдження різних мод та їх поведінку залежно від довжини хвилі. Розв’язання рівнянь Максвелла в циліндричних координатах з відповідними граничними умовами дозволяє визначити моди хвилеводу, що описують, як оптична потужність розповсюджується у волокні. Це є фундаментом для розуміння роботи волоконно-оптичних систем і проєктування ефективних оптичних хвилеводів. Це досить детально зроблено в низці робіт [6, 10, 14–18]. Оскільки повне математичне опрацювання виходить за рамки цього

підрозділу, тут наведено лише результати аналізу рівнянь Максвелла. У разі розв'язанні рівнянь Максвелла для порожнистих металевих хвильоводів розглядаються лише поперечні електричні (TE) та поперечні магнітні (TM) моди.

Гібридні моди (HE та EH) в оптичних волокнах виникають через взаємодію електричного і магнітного полів на межі між осердям і оболонкою. В оптичних волокнах електромагнітні поля не можуть бути строго поперечними через різницю в індексах заломлення осердя і оболонки. Це призводить до виникнення гібридних мод, у яких обидва поля мають поперечні та поздовжні компоненти.

HE (гібридні електричні) моди, в яких поперечне електричне поле домінує над поперечним магнітним полем. EH (гібридні магнітні) моди, в яких поперечне магнітне поле домінує над поперечним електричним полем. Для знаходження мод у волоконно-оптичних хвильоводах часто використовують рівняння Бесселя для опису розподілу полів у круговій симетрії. HE₁₁ – це основний режим у одномодових волокнах, де як поздовжні, так і поперечні компоненти електричного і магнітного полів присутні. Цей режим найбільш ефективний для передачі потужності оптичних сигналів з мінімальними втратами. TE₀₁ – це режим, де поперечне електричне поле є домінуючим і немає поздовжнього електричного поля. Це чисто поперечний режим. Розв'язання рівнянь Максвелла в циліндричних координатах з урахуванням граничних умов на межі осердя і оболонки дозволяє визначити гібридні моди (HE і EH), які мають складнішу структуру, ніж моди в металевих хвильоводах. Основні моди, такі як HE₁₁ і TE₀₁, є критично важливими для розуміння поведінки оптичних сигналів в оптичних волокнах і проектування ефективних оптичних систем.

2.4.1 Основні поняття модових режимів

Мода – це специфічний спосіб розповсюдження електромагнітної хвилі в хвильоводі. У волоконно-оптичних системах моди описують розподіл електричних і магнітних полів у поперечному перерізі волокна. Основна мода (HE₁₁) – це мода найнижчого порядку, яка завжди присутня у волокні. Вона має найменші втрати і забезпечує найкращу стабільність розповсюдження. У одномодових волокнах зазвичай працюють саме з основною модою. Вищі моди – це моди, які мають більш складну структуру полів і можуть розповсюджуватися в багатомодових волокнах. Вони мають вищі втрати і менш стабільні, ніж основна мода.

Перш ніж перейти до обговорення теорії мод у круглих оптичних волокнах, у цьому розділі ми якісно розглянемо появу модальних полів у пласкому діелектричному хвильоводі, зображеному на рис. 2.19. Осердям цього хвильоводу є діелектрична пластина з показником заломлення n_1 , яка затиснута між двома діелектричними шарами з показниками заломлення $n_2 < n_1$. Ці навколишні шари називаються обшивкою. Це є найпростішою формою оптичного хвильоводу і може слугувати моделлю для отримання

розуміння поширення хвиль в оптичних волокнах. Насправді, вигляд поперечного перерізу пластинчастого хвильоводу виглядає так само, як і поперечний переріз оптичного волокна, розрізаного вздовж його осі. На рисунку 2.19 показані діаграми спрямованості декількох поперечних електричних (TE) мод (які є розв'язками рівнянь Максвелла для пластинчастого хвильоводу). Порядок моди дорівнює кількості нулів поля по всій напрямній (місця, де поле дорівнює нулю в центрі напрямної або на осі волокна).

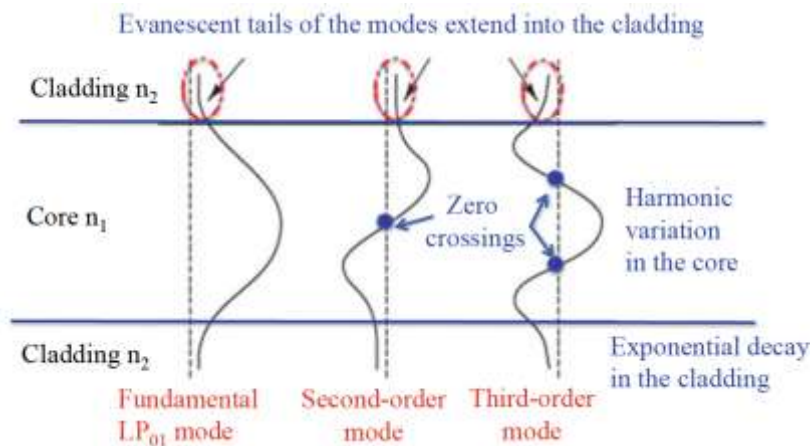


Рисунок 2.19 – Розподіли електричного поля для деяких напрямлених мод нижчих порядків у симетричному пластинчастому хвильоводі

Порядок моди в оптичних волокнах пов'язаний з кутом променя, що відповідає цій моді, і утворюється з площиною хвильоводу (або віссю волокна). Чим крутіший кут, тим вищий порядок моди. Основні моменти, які варто розглянути для кращого розуміння цього зв'язку, містять кут конгруентності, числову апертуру та умовне число мод. В оптичному волокні світло розповсюджується у вигляді мод, які можна уявити як сукупність променів, що рухаються під певними кутами відносно осі волокна. Кут променя відносно осі волокна визначає порядок моди:

- низький порядок моди (наприклад, HE₁₁) відповідає променям, що поширюються під малими кутами до осі волокна;
- високий порядок моди відповідає променям, що поширюються під більш крутим кутом до осі волокна.

Числова апертура (NA) волокна визначає максимальний кут, під яким світло може вводитися у волокно і ефективно розповсюджуватися вздовж нього. Умовне число мод (V-параметр) визначає кількість мод, які можуть розповсюджуватися у волокні. Таким чином, порядок моди дійсно пов'язаний з кутом променя, який утворюється з площиною хвильоводу або віссю волокна. Чим крутіший кут, під яким світло поширюється, тим вищий порядок моди. Це важливо враховувати у процесі проєктування волоконно-оптичних систем, оскільки різні моди можуть мати різні швидкості розповсюдження і втрати, що впливає на загальну ефективність

і якість передачі сигналу. З графіків видно, що електричні поля напрямлених мод не повністю обмежуються центральною діелектричною пластиною (тобто, вони не прямують до нуля на межі розділу напрямних і оболонки), а, навпаки, частково поширюються на оболонку. Поля змінюються гармонічно у напрямній області з показником заломлення n_1 і експоненціально згасають за її межами. Для мод низького порядку поля щільно сконцентровані поблизу центра пластини (або осі оптичного волокна), з невеликим проникненням в область оболонки. З іншого боку, для мод вищих порядків поля розподіляються ближче до країв хвилеводу і проникають далі в область оболонки.

Оптичне волокно може підтримувати два типи мод:

1. Керовані моди (guided modes), які затримуються в осерді волокна завдяки повному внутрішньому відбиттю. Ці моди мають обмежену кількість, і їхні поля значною мірою сконцентровані в осерді волокна;

2. Випромінювані моди (radiation modes), які не затримуються в осерді волокна і не спрямовуються волокном. Вони можуть поширюватися в оболонці або виходити за межі волокна. Випромінювані моди утворюють континуум, оскільки вони не обмежені умовами повного внутрішнього відбиття.

Електричні поля керованих мод не повністю обмежуються осердям волокна; деяка частина поля поширюється в оболонку. Це призводить до таких явищ:

- поля керованих мод осердя можуть взаємодіяти з полями мод оболонки. Оскільки осердя і оболонка присутні вздовж усього волокна, це створює можливість для зв'язку між модами осердя і модами оболонки;

- частина випромінювання, що не задовольняє умови повного внутрішнього відбиття в осерді, може затримуватися в оболонці завдяки заломленню на межі оболонка – навколишнє середовище.

Ці режими також можуть взаємодіяти з керованими модами осердя. Через зв'язок між модами осердя і модами оболонки відбувається дифузія потужності:

- потужність, яка передається через керовані моди осердя, може частково переходити в моди оболонки через зв'язок полів. Це призводить до втрат потужності від керованих мод осердя, оскільки моди оболонки менш ефективно спрямовуються і можуть втрачати потужність через випромінювання;

- оскільки поля керованих мод осердя і мод оболонки взаємодіють, можлива передача потужності назад з мод оболонки в моди осердя. Це може призводити до таких складних ефектів, як інтерференція і зміна фазового стану.

Втрати потужності через зв'язок між модами осердя і оболонки можуть бути значними, особливо в довгих волокнах або волокнах з низькою числовою апертурою. Зв'язок між модами осердя і оболонки може призводити до дифузійних втрат, що зменшує загальну ефективність

передачі сигналу. Для мінімізації втрат і підвищення ефективності передачі світла розробники волокон використовують різні техніки, такі як оптимізація профілю індексу заломлення і вибір матеріалів оболонки. Розуміння взаємодії між керованими модами осердя і модами оболонки є ключовим для оптимізації роботи оптичних волокон. Зв'язок між цими модами призводить до втрат потужності і розсіювання, що впливає на ефективність передачі сигналу. Тому розробка волокон з урахуванням цих факторів є важливим аспектом у вдосконаленні волоконно-оптичних систем.

Керовані моди у волокні виникають, коли значення β задовольняють умову $n_2 k < \beta < n_1 k$. На межі поширення, коли $\beta = n_2 k$, мода більше не є керованою належним чином і називається відсіченою. Таким чином, некеровані або випромінювальні режими з'являються для частот нижче точки відсікання, де $\beta < n_2 k$. Однак поширення хвиль все ще може відбуватися нижче точки відсікання для тих мод, де частина втрат енергії на випромінювання блокується бар'єром кутового моменту, який існує поблизу границі розділу активної зони та оболонки [17]. Ці стани поширення поведуться як частково обмежені керовані моди, а не як моди випромінювання, і називаються режимами витоку [5, 6, 12, 13]. Ці негерметичні моди можуть поширюватися на значні відстані вздовж волокна, але втрачають потужність через витік або тунелювання в оболонці під час поширення.

2.4.2 Довжина хвилі зрізу та нормована частота

Важливим параметром, пов'язаним з умовою відсікання, є нормована частота V (також звана V -числом або V -параметром), яка визначається за формулою

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_c} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (2.27)$$

де апроксимація в правій частині походить з рівняння (2.23).

Цей параметр є безрозмірним числом, яке пов'язане з довжиною хвилі та числовою апертурою і визначає, скільки мод може підтримувати волокно. Кількість мод, які можуть існувати у хвилеводі як функція V , може бути зручно подана в термінах а нормованої постійної поширення b , визначеної Глогом [19]

$$b = \frac{(\beta/k)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2}. \quad (2.28)$$

На рис. 2.20 показано графік залежності b (в термінах β/k) від V для деяких режимів низького порядку. З цього рисунка видно, що, за винятком режиму найнижчого порядку HE_{11} , кожен режим може існувати лише для значень V , які перевищують певне граничне значення (причому для

кожного режиму існує своя межа V). Режими відсікаються у разі $\beta = n_2 k$. Довжина хвилі, на якій відсікаються всі моди вищих порядків, називається довжиною хвилі відсікання λ_c . Мода HE_{11} не має відсічення і перестав існувати лише тоді, коли діаметр осердя дорівнює нулю. Це принцип, на якому базуються одномодові волокна.

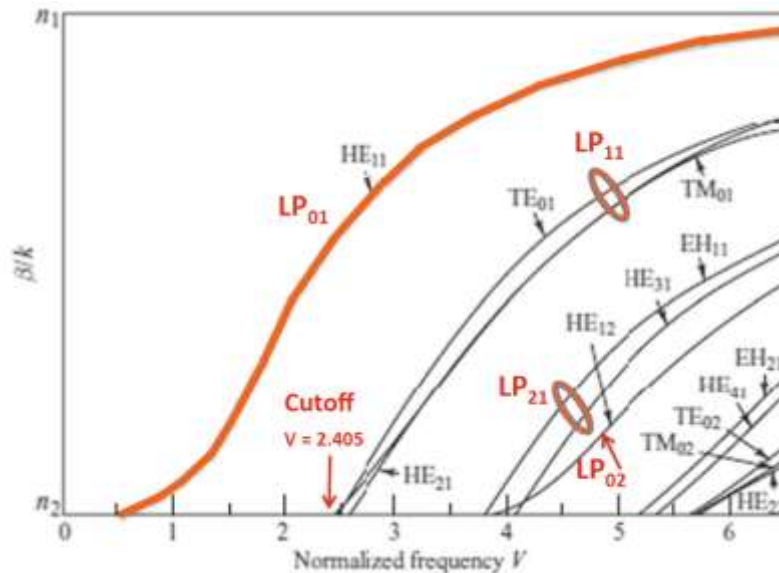


Рисунок 2.20 – Графіки залежності константи поширення (в термінах β/k) від V для деяких мод найнижчого порядку

Правильно вибравши a , n_1 і n_2 так, щоб

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \leq 2.405, \quad (2.29)$$

то всі режими, крім режиму HE_{11} , вимикаються.

Рекомендація ITU-T G.652 стверджує, що ефективна довжина хвилі відсікання має бути менша або дорівнювати 1260 нм для роботи одномодового волокна в діапазоні 1310 нм [20]. Ця специфікація також гарантує, що волокно є одномодовим для роботи в діапазоні 1550 нм.

Приклад 2.8 Розглянемо волокно зі ступінчастим індексом, яке має радіус осердя 5 мкм, індекс осердя $n_1 = 1.480$ та індекс оболонки $n_2 = 1.477$. (а) Покажемо, що на довжині хвилі 820 нм волокно має $V = 3.514$. (б). З рис. 2.20 знайдіть чотири моди, які існують на довжині хвилі 820 нм. (с) Переконайтеся, що на довжині хвилі 1310 нм існує тільки мода HE_{11} .

Для визначення нормованої частоти (V -числа) та кількості мод у волоконно-оптичному хвилеводі, а також для визначення типу мод на різних довжинах хвиль, ми можемо скористатися Python. Наведемо приклад такого коду

```

import numpy as np
def calculate_v_number(wavelength, core_radius, n1, n2):
    """
    Функція для обчислення V-числа
    """
    delta_n = np.sqrt(n1**2 - n2**2)
    v_number = (2 * np.pi * core_radius / wavelength) * delta_n
    return v_number
def determine_modes(v_number):
    """
    Функція для визначення кількості мод
    """
    if v_number < 2.405:
        return "Одномодове волокно (HE11)"
    else:
        num_modes = int((v_number**2) / 2)
        return f"Багатомодове волокно з приблизно {num_modes}
модами"
# Вхідні дані
core_radius = 5e-6 # радіус осердя в метрах (5 мкм)
n1 = 1.480 # індекс заломлення осердя
n2 = 1.477 # індекс заломлення оболонки
# Довжини хвиль
wavelength_820nm = 820e-9 # 820 нм в метрах
wavelength_1310nm = 1310e-9 # 1310 нм в метрах
# Обчислення V-числа для 820 нм
v_number_820nm = calculate_v_number(wavelength_820nm, core_radius,
n1, n2)
modes_820nm = determine_modes(v_number_820nm)
# Обчислення V-числа для 1310 нм
v_number_1310nm = calculate_v_number(wavelength_1310nm,
core_radius, n1, n2)
modes_1310nm = determine_modes(v_number_1310nm)
# Виведення результатів
print(f"Для довжини хвилі 820 нм:")
print(f"V-число: {v_number_820nm:.2f}")
print(f"Кількість мод: {modes_820nm}\n")

print(f"Для довжини хвилі 1310 нм:")
print(f"V-число: {v_number_1310nm:.2f}")
print(f"Кількість мод: {modes_1310nm}")

```

Запустивши цей код, отримаємо:

1. V-число для довжини хвилі 820 нм;

2. Кількість мод на цій довжині хвилі;
3. V-число для довжини хвилі 1310 нм;
4. Тип моди на довжині хвилі 1310 нм.

Для довжини хвилі 820 нм:

V-число: 3.61

Кількість мод: Багатомодове волокно з приблизно 6 модами

Для довжини хвилі 1310 нм:

V-число: 2.26

Кількість мод: Одномодове волокно (HE11)

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

Цей підхід дозволяє з легкістю обчислювати важливі параметри волоконно-оптичних хвилеводів для різних довжин хвиль і індексів заломлення.

Приклад 2.9 Волокно зі ступінчастим індексом має нормовану частоту $V = 26.6$ на довжині хвилі 1300 нм. Якщо радіус осердя становить 25 мкм, яка числова апертура?

Розв'язання. З рівняння (2.27) випливає, що NA дорівнює

$$NA = V \frac{\lambda}{2\pi a} = 26.2 \frac{1.30 \mu\text{m}}{2\pi \times 25 \mu\text{m}} = 0.22.$$

Наведемо приклад лістингу програми мовою Python для визначення значення числової апертури для оптичного волокна зі ступінчастим індексом та нормованою частотою 26.6 на довжині хвилі 1300 нм, радіус осердя волокна 25 мкм.

```
import math
# Вхідні дані
V = 26.6 # нормована частота
lambda_wave = 1300e-9 # довжина хвилі в метрах
a = 25e-6 # радіус осердя в метрах
# Розрахунок числової апертури
NA = V * lambda_wave / (2 * math.pi * a)
# Виведення результату
print(f"Числова апертура (NA): {NA:.4f}")
```

Цей код розраховує значення числової апертури для оптичного волокна з зазначеними параметрами та виводить результат на екран.

Числова апертура (NA): 0.2201

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

Приклад 2.10 Розглянемо волокно з показником заломлення осердя 1,480; показником заломлення оболонки 1,476 і радіусом осердя 4,4 мкм. Використовуючи рівняння (2.27), покажіть, що довжина хвилі, на якій це волокно стає одномодовим з $V = 2.405$, становить $\lambda_c = 1250$ нм.

Наведемо приклад лістингу програми мовою Python для визначення значення довжини хвилі (для одномодового режиму) для оптичного волокна із показником заломлення осердя 1.480, показником заломлення оболонки 1.476 і радіусом осердя 4.4 мкм

```
import math
# Вхідні дані
n_core = 1.480 # показник заломлення осердя
n_cladding = 1.476 # показник заломлення оболонки
a = 4.4e-6 # радіус осердя в метрах
# Розрахунок числової апертури (NA)
NA = math.sqrt(n_core**2 - n_cladding**2)
# Визначення довжини хвилі для одномодового режиму (V = 2.405 для
першого режиму)
V = 2.405
# Розрахунок довжини хвилі (lambda)
lambda_wave = (2 * math.pi * a * NA) / V
# Виведення результату
print(f"Довжина хвилі (λ): {lambda_wave * 1e9:.2f} нм")
```

Пояснення:

1. Спочатку програма визначає показники заломлення осердя та оболонки, а також радіус осердя.
2. Потім обчислюється числова апертура (NA).
3. Використовуючи значення нормованої частоти для першого одномодового режиму (близько 2.405), програма обчислює довжину хвилі.
4. В результаті виводиться довжина хвилі у нанометрах.

Довжина хвилі (λ): 1249.97 нм

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

Число V також може бути використане для вираження кількості мод M у багатомодовому волокні зі ступінчастим індексом, коли V велике. Для випадку багатомодового волокна зі ступінчастим індексом оцінка загальної кількості мод, що підтримуються в такому волокні, становить

$$M = \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 (n_1^2 - n_2^2) = \frac{V^2}{2} . \quad (2.30)$$

Приклад 2.11 Розглянемо багатомодове волокно зі ступінчастим індексом з діаметром осердя 62,5 мкм і різницею індексів осердя і оболонки 1,5%. Якщо показник заломлення осердя становить 1,480, оцінити нормовану частоту волокна і загальну кількість мод, що підтримуються у волокні на довжині хвилі 850 нм.

Розв'язання. З рівняння (2.27) нормована частота становить

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta} = \frac{2\pi \times 31.25 \mu\text{m} \times 1.48}{0.85 \mu\text{m}} \sqrt{2 \times 0.015} = 59.2 .$$

Використовуючи рівняння (2.30), загальна кількість режимів дорівнює

$$M = \frac{V^2}{2} = 1752 .$$

Наведемо приклад лістингу програми мовою Python для визначення значення нормованої частоти багатомодового волокна та загальної кількості мод, що підтримуються у волокні на довжині хвилі 850 нм із ступінчастим індексом з діаметром осердя 62,5 мкм і різницею індексів осердя і оболонки 1,5%, показник заломлення осердя становить 1,480.

```
import math
# Вхідні дані
diameter_core = 62.5e-6 # діаметр осердя в метрах
radius_core = diameter_core / 2 # радіус осердя
lambda_wave = 850e-9 # довжина хвилі в метрах
n_core = 1.480 # показник заломлення осердя
R = 1.5 # різниця індексів в %
# Розрахунок різниці індексів
delta_n = (R / 100) * n_core
n_cladding = n_core - delta_n # показник заломлення оболонки
# Розрахунок числової апертури (NA)
NA = math.sqrt(n_core**2 - n_cladding**2)
# Розрахунок нормованої частоти (V)
V = (2 * math.pi * radius_core) / lambda_wave * NA
# Розрахунок загальної кількості мод (M)
M = V**2 / 2
# Виведення результатів
print(f"Нормована частота (V): {V:.4f}")
print(f"Кількість мод (M): {M:.4f}")
```

Пояснення коду:

1. Вхідні дані: Діаметр осердя, довжина хвилі, показник заломлення осердя та відсоток різниці індексів.

2. Розрахунок:

- Розраховується радіус осердя та показник заломлення оболонки.
- Обчислюється числова апертура (NA).
- Використовуючи формулу, обчислюються нормована частота та кількість мод.

3. Виведення результатів: Результати виводяться на екран.

Нормована частота (V): 58.9927

Кількість мод (M): 1740.0717

** Process exited - Return Code: 0 **

Press Enter to exit terminal

Приклад 2.12 Розглянемо багатомодове оптичне волокно зі східчастим індексом, яке має радіус осердя 25 мкм, індекс осердя 1.48 і різницю індексів $\Delta = 0.01$. Скільки мод у волокні на довжинах хвиль 860, 1310 і 1550 нм?

Розв'язання. (а) По-перше, з рівняння (2.27) на робочій довжині хвилі 860 нм значення V дорівнює

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta} = \frac{2\pi \times 25 \mu m \times 1.48}{0.86 \mu m} \sqrt{2 \times 0.01} = 38.2 .$$

Використовуючи рівняння (2.30), загальна кількість мод на довжині хвилі 860 нм становить

$$M = \frac{V^2}{2} = 729 .$$

(b) Аналогічно, при 1310 нм параметр $V = 25.1$ і $M = 315$.

(c) Нарешті, при 1550 нм параметр $V = 21.2$ і $M = 224$.

Наведемо як приклад лістингу програми мовою Python для визначення значення нормованої частоти та кількості мод у багатомодовому волокні зі східчастим індексом на довжинах хвиль 860, 1310 і 1550 нм, яке має радіус осердя 25 мкм, індекс осердя 1.48 і різницю індексів $\Delta = 0.01$.

```
import math
# Вхідні дані
radius_core = 25e-6 # радіус осердя в метрах
n_core = 1.48 # показник заломлення осердя
```

```

delta_index = 0.01 # різниця індексів
# Довжини хвиль у метрах
wavelengths = [860e-9, 1310e-9, 1550e-9] # 860, 1310, 1550 нм
# Результати
results = []
for wavelength in wavelengths:
    # Розрахунок показника заломлення оболонки
    n_cladding = n_core - delta_index

    # Розрахунок числової апертури (NA)
    NA = math.sqrt(n_core**2 - n_cladding**2)

    # Розрахунок нормованої частоти (V)
    V = (2 * math.pi * radius_core) / wavelength * NA

    # Розрахунок загальної кількості мод (M)
    M = V**2 / 2

    # Збереження результатів
    results.append((wavelength * 1e9, V, M)) # Довжина хвилі в нм, V, M
# Виведення результатів
print("Довжина хвилі (нм) | Нормована частота (V) | Кількість мод (M)")
print("-----")
for result in results:
    print(f"{result[0]:>20.2f} | {result[1]:>20.4f} | {result[2]:>15.4f}")
### Пояснення коду:
1. Вхідні дані містять радіус осердя, показник заломлення осердя та різницю індексів.
2. Довжини хвиль задаються в метрах.
3. Для кожної довжини хвилі:
    - розраховується показник заломлення оболонки;
    - обчислюється числова апертура NA;
    - розраховується нормована частота V та кількість мод M.
4. Результати зберігаються у списку та виводяться на екран у читабельному форматі.
    Довжина хвилі (нм) | Нормована частота (V) | Кількість мод (M)
-----
    860.00 |                31.3713 |           492.0790
    1310.00 |               20.5949 |           212.0749
    1550.00 |               17.4060 |           151.4846

** Process exited - Return Code: 0 **
Press Enter to exit terminal

```

Приклад 2.13 Розглянемо три багатомодових оптичних волокна зі ступінчастим індексом, кожне з яких має індекс осердя 1.48 і різницю індексів $\Delta=0.01$. Припустимо, що ці три волокна мають діаметр осердя 50, 62,5 і 100 мкм. Скільки мод у цих волокнах на довжині хвилі 1550 нм?

Розв'язання

- (а) По-перше, з рівняння (2.27) при діаметрі осердя 50 мкм значення V дорівнює

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta} = \frac{2\pi \times 25 \mu m \times 1.48}{1.55 \mu m} \sqrt{2 \times 0.01} = 21.2 .$$

Використовуючи рівняння (2.30), загальна кількість мод у волокні з діаметром осердя 50 мкм дорівнює

$$M = \frac{V^2}{2} = 224 .$$

- (b) Аналогічно, при 62,5 мкм параметр $V = 26,5$ і $M = 351$.

- (c) Нарешті, при 100 мкм параметр $V = 42,4$ і $M = 898$.

Наведемо програму мовою Python, яка визначає значення нормованої частоти та кількості мод у трьох багатомодових волокнах зі ступінчастим індексом на довжині хвилі 1,55 мкм. У програмі використовуються задані параметри: індекс осердя, різниця індексів та діаметри осердя.

```
import math
# Вхідні дані
diameters_microns = [50, 62.5, 100] # діаметри осердя в мікрометрах
index_core = 1.48                    # індекс осердя
delta = 0.01                         # різниця індексів
wavelength_microns = 1.55           # довжина хвилі в мікрометрах
# Конвертація одиниць
wavelength_m = wavelength_microns * 1e-6 # довжина хвилі в метрах
index_cladding = index_core - delta      # індекс оболонки
# Функція для розрахунку нормованої частоти та кількості мод
def calculate_modes(diameter_microns):
    radius_core_m = (diameter_microns / 2) * 1e-6 # радіус осердя в метрах
    V = (2 * math.pi * radius_core_m / wavelength_m) *
    math.sqrt(index_core**2 - index_cladding**2)
    M = V**2 / 2
    return V, M
# Основна частина програми
for diameter in diameters_microns:
```

```
V, M = calculate_modes(diameter)
print(f'Діаметр осердя: {diameter} мкм")
print(f'Нормована частота V: {V:.2f}")
print(f'Кількість мод M: {M:.2f}\n")
```

Пояснення програми:

1. Вхідні дані: Визначаються діаметри осердя в мікрометрах, індекс осердя, різниця індексів та довжина хвилі.
2. Конвертація одиниць: Діаметри та довжина хвилі конвертуються в метри.
3. Функція `'calculate_modes'`: Розраховує нормовану частоту V та кількість мод M для заданого діаметра осердя.
4. Цикл: Для кожного діаметра осердя програма обчислює V та M та виводить результати.

```
Діаметр осердя: 50 мкм
Нормована частота V: 17.41
Кількість мод M: 151.48
```

```
Діаметр осердя: 62.5 мкм
Нормована частота V: 21.76
Кількість мод M: 236.69
```

```
Діаметр осердя: 100 мкм
Нормована частота V: 34.81
Кількість мод M: 605.94
```

```
** Process exited - Return Code: 0 **
Press Enter to exit terminal
```

2.4.3 Оптична потужність у волокнах зі ступінчастим індексом

Останньою величиною, що стосується волокон зі ступінчастим індексом, є частковий потік потужності в осерді і оболонці для заданого режиму. Як показано на рис. 2.19, електромагнітне поле для заданої моди не прямує до нуля на межі розділу осердя і оболонки, а змінюється від коливальної форми в осерді до експоненціального спаду в оболонці. У багатомодових оптичних волокнах активна зона (осердя) має вищий індекс заломлення, ніж оболонка. Це дозволяє світловим модам залишатися всередині волокна завдяки явищу повного внутрішнього відбиття. Частота зрізу (cut-off frequency) – це частота, при якій мода більше не може підтримуватися в осерді волокна. При наближенні до частоти зрізу електромагнітне поле моди починає проникати в оболонку, що веде до зменшення інтенсивності поля в активній зоні. Коли мода знаходиться далеко від частоти зрізу, більша частина електромагнітної енергії концентрується в осерді, що забезпечує високу ефективність передачі сигналу. Однак коли мода наближається до частоти зрізу, енергія починає

переходити в оболонку, що може призвести до зниження ефективності передачі сигналу. Після досягнення частоти зрізу мода не може бути підтримувана в осерді, і поле стає повністю випромінювальним. У цьому режимі вся оптична потужність моди переноситься в оболонку, і волокно вже не може підтримувати цю моду. Ці принципи є важливими для розуміння роботи оптичних волокон, особливо у разі проектування систем передачі даних та виборі відповідних волокон для різних застосувань. У випадках великих значень V частку середньої оптичної потужності, що перебуває в оболонці, можна оцінити за формулою

$$\frac{P_{clad}}{P} = \frac{4}{3\sqrt{M}}, \quad (2.31)$$

де P – повна оптична потужність у волокні. Зауважте, що, оскільки M пропорційна V^2 , потік потужності в оболонці зменшується зі збільшенням V . Однак це збільшує кількість мод у волокні, що не бажано для забезпечення високої пропускної спроможності.

Приклад 2.14 Розглянемо багатомодове оптичне волокно зі ступінчастим індексом, яке має радіус осердя 25 мкм, індекс осердя 1,48 і різницю індексів $\Delta = 0.01$. Знайти відсоток оптичної потужності, яка поширюється в оболонці на довжині хвилі 840 нм.

Розв’язання. З рівняння (2.27) на робочій довжині хвилі 840 нм значення V становить

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta} = \frac{2\pi \times 25 \mu\text{m} \times 1.48}{0.84 \mu\text{m}} \sqrt{2 \times 0.01} = 39.$$

Використовуючи рівняння (2.30), загальна кількість режимів дорівнює

$$M = \frac{V^2}{2} = 760.$$

З рівняння (2.31) випливає, що

$$\frac{P_{clad}}{P} = \frac{4}{3\sqrt{M}} = 0.048.$$

Таким чином, приблизно 4,8% оптичної потужності поширюється в оболонці. Якщо Δ зменшити до 0,03, щоб зменшити дисперсію сигналу, то у волокні є 242 моди і близько 8,6% потужності поширюється в оболонці.

Для розрахунку нормованої частоти (V-числа), кількості мод та відсотка оптичної потужності, яка поширюється в оболонці оптичного багатомодового волокна зі ступінчастим індексом, можна використати нижченаведену програму мовою Python.

```
import math
# Вхідні параметри
wavelength = 840e-9 # довжина хвилі в метрах (840 нм)
core_radius = 25e-6 # радіус осердя в метрах (25 мкм)
n_core = 1.48 # індекс осердя
delta = 0.01 # різниця індексів
# Розрахунок індексу оболонки
n_cladding = n_core * (1 - delta)
# Розрахунок нормованої частоти (V-числа)
V = (2 * math.pi * core_radius / wavelength) * math.sqrt(n_core**2 -
n_cladding**2)
print(f"Нормована частота (V-число): {V:.2f}")
# Розрахунок кількості мод
num_modes = (V**2) / 2
print(f"Кількість мод: {num_modes:.2f}")
# Розрахунок відсотка потужності в оболонці
power_cladding_percentage = 1 - (2 / V)
power_cladding_percentage *= 100 # перетворюємо у відсотки
print(f"Відсоток оптичної потужності в оболонці:
{power_cladding_percentage:.2f}%")
```

Ця програма має такі кроки:

1. Встановлює параметри волокна та довжину хвилі;
2. Розраховує індекс рефракції оболонки;
3. Обчислює нормовану частоту (V-число);
4. Використовує V-число для розрахунку кількості мод;
5. Розраховує відсоток потужності, що поширюється в оболонці.

Нормована частота (V-число): 39.04

Кількість мод: 762.13

Відсоток оптичної потужності в оболонці: 94.88%

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

Приклад 2.15 Розглянемо багатомодове оптичне волокно зі ступінчастим індексом, яке має діаметр осердя 62,5 мкм, індекс осердя 1,48 і різницю індексів $\Delta = 0.01$. Покажемо, що на довжині хвилі 840 нм (а) значення V дорівнює 49, (b) загальна кількість режимів 1200, і (c) оптична потужність, яка поширюється в оболонці, становить 3.8%.

Для розрахунку нормованої частоти (V-числа), кількості режимів та відсотка оптичної потужності, яка поширюється в оболонці оптичного багатомодового волокна зі ступінчастим індексом, використайте нижчевказаний Python-код.

```
import math
# Вхідні параметри
wavelength = 840e-9 # довжина хвилі в метрах (840 нм)
core_radius = 62.5e-6 # радіус осердя в метрах (62.5 мкм)
n_core = 1.48 # індекс осердя
delta = 0.01 # різниця індексів
# Розрахунок індексу оболонки
n_cladding = n_core * math.sqrt(1 - delta)
# Розрахунок нормованої частоти (V-числа)
V = (2 * math.pi * core_radius / wavelength) * math.sqrt(n_core**2 -
n_cladding**2)
print(f"Нормована частота (V-число): {V:.2f}")
# Розрахунок кількості режимів
num_modes = (V**2) / 2
print(f"Кількість режимів: {num_modes:.2f}")
# Розрахунок відсотка потужності в оболонці
power_cladding_percentage = (1 - (n_cladding / n_core)**2) * 100
print(f"Відсоток оптичної потужності в оболонці:
{power_cladding_percentage:.2f}%")
```

Ця програма має такі кроки:

1. Встановлює параметри волокна та довжину хвилі;
2. Розраховує індекс рефракції оболонки;
3. Обчислює нормовану частоту (V-число);
4. Використовує V-число для розрахунку кількості режимів;
5. Розраховує відсоток потужності, що поширюється в оболонці.

Нормована частота (V-число): 69.19

Кількість режимів: 2393.62

Відсоток оптичної потужності в оболонці: 1.00%

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

2.4.4 Лінійно поляризовані моди

Хоча теорія поширення світла в оптичних волокнах добре вивчена, повний опис режимів спрямованого передавання і випромінювання вимагає використання шестикомпонентних гібридних електромагнітних полів, які мають дуже складні математичні вирази. Спрощення [19, 21–24] цих виразів можна здійснити на практиці, оскільки волокна зазвичай конструюються так, щоб різниця в індексах відбиття осердя і оболонки

була дуже малою, тобто $n_1 - n_2 \ll 1$, що дозволяє використовувати певні приближення для опису поведінки світла в оптичних волокнах. Зокрема, можна застосувати методи, засновані на теорії малих коефіцієнтів відбиття, що дозволяє зосередитися на основних режимах та зменшити складність обчислень. У такому випадку можуть бути використані такі підходи, як метод геометричної оптики для опису траєкторій світла в волокнах, а також методи модального аналізу для вивчення розподілу електромагнітних полів у різних режимах. Оскільки в оптичних волокнах основними є лише кілька мод, це дозволяє спростити математичні вирази і зосередитися на ключових аспектах їх роботи. Крім того, врахування дисперсії, втрат в матеріалі та інших факторів, які можуть впливати на передачу світла, є важливими для точного моделювання і прогнозування поведінки оптичних волокон. Це охоплює вивчення впливу температури, механічних деформацій та інших зовнішніх чинників на характеристики передавання. Таким чином, спрощення математичних моделей і використання наближених методів дозволяє більш ефективно аналізувати й проєктувати оптичні волокна, що є важливим для розвитку сучасних комунікаційних технологій. За такого припущення потрібно враховувати лише чотири компоненти поля, і їхні вирази значно спрощуються. Компоненти поля називаються лінійно поляризованими (ЛП) модами і позначаються LP_{jm} , де j і m – цілі числа, що позначають розв'язки мод. У цій схемі для мод найнижчого порядку кожна мода LP_{0m} є похідною від моди HE_{1m} , а кожен режим LP_{1m} походить від режимів TE_{0m} , TM_{0m} та HE_{0m} . Отже, фундаментальній моді LP_{01} відповідає мода HE_{11} , яка є єдиною модою, що поширюється в одномодовому волокні. На рис. 2.20 показані моди LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} і LP_{02} та їх співвідношення з модами нижчого порядку HE , EH , TE і TM .

У межах слабо спрямовувального наближення всі режими, що характеризуються спільним набором j та m , задовольняють одне характеристичне рівняння. Це означає, що такі режими є виродженими. Таким чином, якщо мода $HE_{v+1,m}$ вироджена з модою $EH_{v-1,m}$ (тобто, якщо моди HE і EH відповідного радіального порядку m і рівного окружного порядку v утворюють вироджені пари), то будь-яка комбінація моди $HE_{v+1,m}$ з модою $EH_{v-1,m}$ буде також являти собою спрямовану моду волокна.

Відповідні LP -моди позначаються як LP_{jm} -моди незалежно від їхньої TM , TE , EH або HE конфігурації поля. Загалом, виконуються нижчевказані умови:

1. Кожна мода LP_{0m} є похідною від моди HE_{1m} ;
2. Кожен режим LP_{1m} походить від режимів TE_{0m} , TM_{0m} і HE_{2m} ;
3. Кожен режим LP_{vm} ($v \geq 2$) походить від режимів $HE_{v+1,m}$ та $EH_{v-1,m}$.

Відповідність між десятьма режимами LP найнижчого порядку (тобто тими, що мають найнижчі частоти зрізу) і традиційними режимами TM , TE , EH і HE наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Перелік лінійно поляризованих мод нижчого порядку

LP-mode designation	Traditional-mode designation and number of modes	Number of degenerate modes
LP01	$HE_{11} \times 2$	2
LP11	$TE_{01}, TM_{01}, HE_{21} \times 2$	4
LP21	$EH_{11} \times 2, HE_{31} \times 2$	4
LP02	$HE_{12} \times 2$	2
LP31	$EH_{21} \times 2, HE_{41} \times 2$	4
LP12	$TE_{02}, TM_{02}, HE_{22} \times 2$	4
LP41	$EH_{31} \times 2, HE_{51} \times 2$	4
LP22	$EH_{12} \times 2, HE_{32} \times 2$	4
LP03	$HE_{13} \times 2$	2
LP51	$EH_{41} \times 2, HE_{61} \times 2$	4

Ця таблиця також показує кількість вироджених режимів.

2.5 Одномодові волокна

У багатомодових волокнах різні моди (шляхи, якими проходить світло) поширюються з різними швидкостями, що викликає міжмодову дисперсію. Це призводить до спотворення сигналу і обмеження максимальної швидкості передачі даних. Одномодове волокно (SMF) вирішує цю проблему, оскільки в ньому лише одна мода може поширюватися, що значно зменшує дисперсію. Це дозволяє досягти високої пропускної спроможності та передавати сигнали на великі відстані без істотних втрат якості. Одномодове волокно зазвичай використовується в телекомунікаційних системах, де важливо забезпечити високу швидкість передачі даних і стабільність сигналу. Крім того, конструкція SMF дозволяє зменшити втрати сигналу, що робить його оптимальним вибором для сучасних мереж зв'язку, зокрема для міжміських з'єднань і магістральних мереж. Таким чином, одномодове волокно є ключовим елементом у забезпеченні швидкісного та надійного обміну даними в сучасному світі.

2.5.1 Будова SMF

Одномодові волокна будуються так, щоб розміри діаметра осердя дорівнювали значенням в кілька довжин хвиль (зазвичай від 8 до 12) і з невеликою різницею індексів між осердям і оболонкою. З рівняння (2.27) у разі $V = 2.4$ видно, що одномодове поширення можливе при досить великих варіаціях значень фізичного розміру активної зони a і різниці індексів активної зони та оболонки. Однак в практичних конструкціях одномодових волокон [25] різниця індексів осердя і оболонки варіюється в межах 0,2 до 1,0%, а діаметр осердя має бути вибраний таким чином, щоб бути трохи нижче відсікання першої моди вищого порядку, тобто, для V трохи менше 2,4.

Приклад 2.16 Інженер-виробник хоче виготовити оптичне волокно з індексом осердя 1,480 і індексом оболонки 1,478. Яким має бути розмір осердя для одномодової роботи на довжині хвилі 1550 нм?

Розв'язання. Використовуючи умову, що $V \leq 2,405$ має бути виконано для одномодового режиму, то з рівняння (2.27)

$$a = \frac{V\lambda}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \leq \frac{2.405 \times 1.55 \mu\text{m}}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(1.480)^2 - (1.478)^2}} = 7.7 \mu\text{m}.$$

Якщо це волокно також має бути одномодовим на довжині хвилі 1310 нм, то радіус осердя має бути меншим за 6,50 мкм.

Як приклад наведемо лістинг програми мовою Python для визначення розміру осердя оптичного волокна при одномодовій роботі на довжині хвилі 1550 нм з індексом осердя 1,480 і індексом оболонки 1,478

```
import math
def calculate_core_radius(wavelength, n_core, n_cladding, V_limit):
    # Обчислюємо максимальний радіус осердя
    delta_n = n_core**2 - n_cladding**2
    if delta_n <= 0:
        raise ValueError("Індекс заломлення осердя має бути більшим за
індекс заломлення оболонки.")

    a_max = (V_limit * wavelength) / (2 * math.pi * math.sqrt(delta_n))
    return a_max
# Задані параметри
wavelength = 1550e-9 # Довжина хвилі в метрах
n_core = 1.480      # Індекс заломлення осердя
n_cladding = 1.478  # Індекс заломлення оболонки
V_limit = 2         # Ліміт для одномодової роботи
try:
    core_radius = calculate_core_radius(wavelength, n_core, n_cladding,
V_limit)
    print(f"Максимальний радіус осердя для одномодової роботи:
{core_radius:.6e} м")
except ValueError as e:
    print(e)
```

Як працює програма:

1. Визначаємо функцію `calculate\_core\_radius`, яка приймає довжину хвилі, індекси заломлення осердя та оболонки, а також ліміт параметра V;
2. Обчислюємо різницю квадратів індексів заломлення;

3. Використовуємо формулу для розрахунку максимального радіусу осердя;

4. Виводимо результат.

Максимальний радіус осердя для одномодової роботи: 6.414573e-06 м

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

Приклад 2.17 Інженер з експлуатації має оптичне волокно з радіусом осердя 3,0 мкм і числовою апертурою 0,1. Чи буде це волокно працювати в одномодовому режимі на довжині хвилі 800 нм?

Розв'язання. З рівняння (2.27)

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA = \frac{2\pi \times 3 \mu m}{0.80 \mu m} 0.10 = 2.356 .$$

Оскільки $V < 2,405$, це волокно буде працювати в одномодовому режимі на довжині хвилі 800 нм.

Як приклад наведемо лістинг програми мовою Python для визначення значення нормованої частоти та можливості роботи волокна в одномодовому режимі на довжині хвилі 800 нм з радіусом осердя 3,0 мкм і числовою апертурою 0,1

```
import math
def calculate_normalized_frequency(radius, wavelength,
numerical_aperture):
    # Обчислюємо нормовану частоту V
    V = (2 * math.pi * radius) / wavelength * numerical_aperture
    return V
Задані параметри
wavelength = 800e-9 # Довжина хвилі в метрах (800 нм)
core_radius = 3.0e-6 # Радіус осердя в метрах (3,0 мкм)
numerical_aperture = 0.1 # Числова апертура
Обчислюємо нормовану частоту
V = calculate_normalized_frequency(core_radius, wavelength,
numerical_aperture)
# Перевіряємо, чи може волокно працювати в одномодовому режимі
if V <= 2.405:
    mode = "може працювати в одномодовому режимі"
else:
    mode = "не може працювати в одномодовому режимі"
Виводимо результати
print(f"Нормована частота V: {V:.2f}")
print(f"Волокно {mode}.")
```

Як працює програма?

Визначаємо функцію `calculate_normalized_frequency`, яка приймає радіус осердя, довжину хвилі та числову апертуру. Вона обчислює нормовану частоту V .

Встановлюємо задані параметри: довжину хвилі (800 нм), радіус осердя (3,0 мкм) і числову апертуру (0,1).

Викликаємо функцію для обчислення V і перевіряємо, чи може волокно працювати в одномодовому режимі (значення V менше або дорівнює 2,405).

Виводимо результати на екран.

Нормована частота V : 2.36

Волокно може працювати в одномодовому режимі.

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

2.5.2 Визначення діаметра модового поля

У випадку багатомодових волокон діаметр осердя і числова апертура є ключовими параметрами для опису властивостей передачі сигналу. В одномодових волокнах геометричний розподіл потужності оптичних сигналів в режимі поширення – це те, що потрібно для прогнозування експлуатаційних характеристик цих волокон. Таким чином, в одномодовому волокні фундаментальним параметром є діаметр модового поля (MFD). Цей параметр може бути визначений з розподілу мод для основної моди волокна і є функцією довжини хвилі оптичного джерела, радіуса осердя і профілю показника заломлення волокна. Діаметр модового поля аналогічний діаметру осердя в багатомодових волокнах, за винятком того, що в одномодових волокнах не вся потужність оптичних сигналів, яка поширюється по волокну, переноситься в осерді. Наприклад, при $V = 2$ тільки 75% оптичної потужності обмежується осердям. Цей відсоток збільшується для більших значень V і зменшується для менших значень V .

MFD є важливим параметром для одномодового волокна, оскільки він використовується для прогнозування таких властивостей волокна, як втрати на з'єднанні, втрати на вигині, довжина хвилі відсікання та дисперсія хвилеводу. Для характеристики і вимірювання MFD було запропоновано різні моделі [26–31]. Вони містять сканування в дальньому полі, сканування в ближньому полі, поперечний зсув, змінну апертуру в дальньому полі, метод вістря ножа і маску. Основна увага в усіх цих методах приділяється тому, як апроксимувати розподіл оптичної потужності.

Стандартна методика знаходження MFD полягає у вимірюванні інтенсивності в дальньому полі розподілу $E^2(r)$, а потім обчислення MFD за допомогою рівняння Петермана II [28].

$$\text{MFD} = 2w_0 = 2 \left[\frac{2 \int_0^\infty E^2(r) r^3 dr}{\int_0^\infty E^2(r) r dr} \right]^{1/2}, \quad (2.32)$$

де параметр $2w_0$ (де w_0 називається розміром плями або радіусом модового поля) є повною шириною розподілу дальнього поля. Для спрощення обчислень точний розподіл поля можна підігнати до гаусової функції [22].

$$E(r) = E_0 \exp(-r^2/w_0^2), \quad (2.33)$$

де r – радіальне положення в розподілі поля,

E_0 – поле на нульовому радіусі, як показано на рис. 2.21.

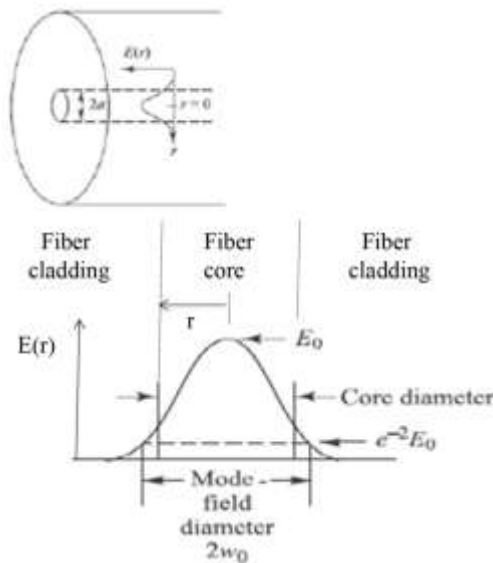


Рисунок 2.21 – Розподіл потужності оптичних сигналів в одномодовому волокні вище його довжини хвилі відсікання

Тоді MFD задається шириною $1/e^2$ оптичної потужності. Гаусова картина, наведена в рівнянні (2.33), є хорошим наближенням для значень V , що лежать між 1,8 і 2,4, що позначає робочу область практичних одномодових волокон.

Наближення до відносного розміру плями w_0/a , яке для волокна зі ступінчастим індексом має точність краще 1% в діапазоні $1.2 < V < 2.4$, забезпечується формулою

$$\frac{w_0}{a} = 0.65 + 1.619V^{-3/2} + 2.879V^{-6}. \quad (2.34)$$

Умова $V = 2.405$ для одномодової роботи дає $w_0/a = 1.1005$. Зі зменшенням V від 2,4 розмір плями збільшується. Таким чином, розмір плями стає поступово більшим за радіус осердя a і поширюється далі, вглиб оболонки. В результаті, коли V стає меншим, оптичний промінь стає менш щільно пов'язаним з осердям і стає більш чутливим до втрат

оптичної потужності в оболонці. Тому виробники, зазвичай, розробляють свої волокна зі значеннями V , більшими за 2,0, щоб запобігти високим втратам в оболонці, але деякі – менше 2,4, щоб уникнути можливості мати більше, ніж одну моду у волокні.

Приклад 2.18 Певне одномодове волокно зі ступінчастим індексом має $MFD = 11,2$ мкм і $V = 2.25$. Який діаметр осердя цього волокна?

Розв'язання. З рівняння (2.32) $w_0 = MFD/2 = 5,6$ мкм. Використання рівняння (2.34) дає

$$a = w_0 / (0.65 + 1.619V^{-3/2} + 2.879V^{-6}) = \frac{5.6 \mu m}{0.65 + 1.619V^{-3/2} + 2.879V^{-6}} = \frac{5.6 \mu m}{1.152} = 4.86 \mu m.$$

Отже, діаметр осердя дорівнює $2a = 9.72$ мкм.

Як приклад наведемо лістинг програми мовою Python, яка розраховує радіус і діаметр осердя оптичного волокна зі ступінчастим індексом, використовуючи значення модального діаметра (MFD) та V -параметра.

Врахуйте, що діаметр осердя можна розрахувати безпосередньо як MFD, оскільки MFD визначає поле моди, що приблизно дорівнює діаметру осердя:

1. ****MFD**** (Modal Field Diameter) – це модальний діаметр волокна.
2. ****V-параметр**** – параметр, який характеризує осердя.

Вхідні дані

MFD = 11.2e-6 # Модальний діаметр, м (перетворено з мкм)

V = 2.25 # V-параметр

Розрахунок

Діаметр осердя

diameter = MFD # Діаметр осердя дорівнює MFD

Радіус осердя

radius = diameter / 2

Виведення результатів

print(f"Діаметр осердя оптичного волокна: {diameter * 1e6:.2f} мкм")

print(f"Радіус осердя оптичного волокна: {radius * 1e6:.2f} мкм")

Діаметр осердя оптичного волокна: 11.20 мкм

Радіус осердя оптичного волокна: 5.60 мкм

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

Приклад 2.19 Порівняти відносний розмір плями w_0/a для значень V 1.2, 1.8 та 2.4.

Як приклад наведемо лістинг програми мовою Python для визначення та порівняння відносного розміру плями w_0/a для значень V 1.2, 1.8 та 2.4

```
import numpy as np
# Вхідні дані
V_values = [1.2, 1.8, 2.4]
a = 1.0 # Припустимо, що радіус осердя a = 1.0 (нормалізуємо)
# Розрахунок w0/a для кожного значення V
relative_spot_sizes = []
for V in V_values:
    w0 = (2.405 / V) * a # Припустимо, що w0 пропорційно a
    relative_size = w0 / a
    relative_spot_sizes.append(relative_size)
# Виведення результатів
for V, size in zip(V_values, relative_spot_sizes):
    print(f'V = {V}: відносний розмір плями w0/a = {size:.4f}')
```

$V = 1.2$: відносний розмір плями $w_0/a = 2.0042$

$V = 1.8$: відносний розмір плями $w_0/a = 1.3361$

$V = 2.4$: відносний розмір плями $w_0/a = 1.0021$

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

2.5.3 Походження подвійного заломлення променя

Важливо пам'ятати, що в будь-якому звичайному одномодовому волокні є фактично два незалежних, вироджених режими поширення [32–34]. Ці моди дуже схожі, але їхні площини поляризації ортогональні. Вони можуть бути обрані довільно як горизонтальна (H) і вертикальна (V) поляризації, як показано на рис. 2.22.

Будь-який з цих двох поляризаційних режимів є фундаментальним режимом HE_{11} . Загалом, електричне поле оптичних сигналів, що поширюються вздовж волокна, є лінійною суперпозицією цих двох поляризаційних мод і залежить від поляризації світла в точці запуску в оптичне волокно.

Припустимо, що одна з мод вибрана довільно так, що її поперечне електричне поле поляризоване вздовж напрямку x , а інша незалежна, ортогональна мода поляризована в напрямку y , як показано на рис. 2.22. В ідеальних волокнах з ідеальною ротаційною симетрією обидві моди є виродженими з рівними константами поширення ($\beta_x = \beta_y$), і будь-який стан поляризації, введений у волокно, буде поширюватися без змін. У реальних волокнах існують такі недосконалості, як асиметричні бічні напруження, некруглі осердя і варіації профілів показника заломлення.

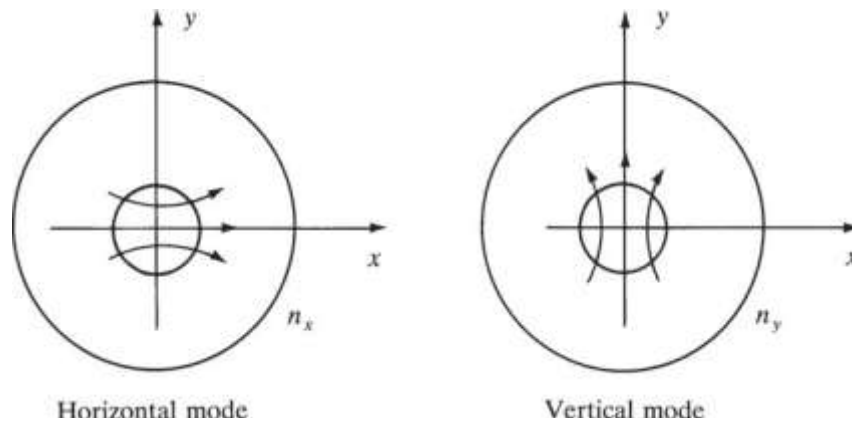


Рисунок 2.22 – Дві поляризації фундаментальної моди HE₁₁ в одномодовому волокні

Ці недосконалості порушують кругову симетрію ідеального волокна і призводять до виродження двох мод. Потім моди поширюються з різними фазовими швидкостями, а різниця між їхніми ефективними показниками заломлення називається двопробним заломленням волокна,

$$B_f = \frac{\lambda}{2\pi}(\beta_x - \beta_y). \quad (2.35)$$

Коли в оптичне волокно вводяться сигнали, що збуджують кілька мод, різниця в фазі між цими модами може змінюватися, що призводить до періодичної взаємодії між ними. Ця взаємодія може викликати явище, відоме як «модове биття» (mode beating), яке пов'язане з періодичними змінами амплітуди та фази сигналу внаслідок різниці в швидкостях поширення мод. Коли різниця фаз стає кратною 2π , це означає, що моди знову «збігаються», і стан вхідної поляризації відтворюється. Довжина, на якій відбувається це биття, дійсно називається «довжиною хвильового розмаху» (beat length). Вона визначається як відстань, на якій різниця фаз між модами змінюється на 2π . Цей параметр є важливим у разі проектування оптичних систем, оскільки він впливає на ефективність передачі інформації в багатомодових волокнах. Загалом, розуміння цього процесу є ключовим для оптимізації продуктивності оптичних волокон, особливо в контексті систем, що використовують мультиплексування за модами для підвищення пропускної спроможності. Отже, довжина, на якій відбувається це биття, називається довжиною хвильового розмаху волокна

$$L_B = \frac{\lambda}{B_f} = \frac{2\pi}{(\beta_x - \beta_y)}. \quad (2.36)$$

Приклад 2.20 Одномодове оптичне волокно має довжину до точки биття 8 см на довжині хвилі 1310 нм. Чому дорівнює подвійне заломлення променя?

Розв'язання. З рівняння (2.36) модальне подвійне заломлення променя дорівнює

$$B_f = \frac{\lambda}{L_B} = \frac{1.31 \times 10^{-6} \text{ m}}{8 \times 10^{-2} \text{ m}} = 1.64 \times 10^{-5}.$$

Це характерно для волокна проміжного типу, оскільки подвійне заломлення променя може змінюватися від $B_f = 1 \times 10^{-3}$ (для типового волокна з високим подвійним заломленням) до $B_f = 1 \times 10^{-8}$ (для типового волокна з низьким подвійним заломленням) [6].

Щоб визначити значення модового подвійного заломлення променя (біфрінгенції) в одномодовому оптичному волокні з довжиною до точки биття 8 см на довжині хвилі 1310 нм, ви можете скористатися таким Python кодом. В цьому випадку передбачається, що у вас є відповідні теоретичні формули і константи.

```
import math
# Константи
wavelength = 1310e-9 # Довжина хвилі в метрах (1310 нм)
beat_length = 0.08 # Довжина до точки биття в метрах (8 см)
# Розрахунок модової біфрінгенції
# Формула для розрахунку модової біфрінгенції:  $B = \lambda / L_b$ 
modal_birefringence = wavelength / beat_length
print(f"Значення модового подвійного заломлення променя (біфрінгенції): {modal_birefringence:.5e}")
```

Запустивши цей код, ви отримаєте значення модового подвійного заломлення променя для заданих параметрів.

Значення модового подвійного заломлення променя (біфрінгенції):
1.63750e-05

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

2.5.4 Ефективний показник заломлення

З рівнянь Максвелла можна показати, що фаза фундаментальної моди HE_{11} (або, еквівалентно, моди LP_{01}) визначається за допомогою константи поширення хвилі β для цієї моди. Для різних застосунків, наприклад, у процесі обговорення поширення сигналу в багатомодових волокнах або аналізуючи волоконні бреггівські решітки, корисно визначити ефективний показник заломлення n_{eff} . Основне визначення полягає в тому, що для деякої моди волокна константа поширення β є фактором n_{eff} , помноженим на хвильове число вакууму $k_0 = 2\pi/\lambda$, тобто,

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k_0}. \quad (2.37)$$

У стандартному одномодовому волокні, оскільки фундаментальна керована мода LP_{01} значно виходить за межі осердя, ефективний показник заломлення має значення, що лежить між показниками заломлення осердя і оболонки. У багатомодовому волокні моди вищих порядків поширюються далі в оболонку і мають менші ефективні показники заломлення, ніж моди нижчих порядків. Точне значення ефективного показника заломлення залежить від таких факторів, як конкретна мода, що розглядається, розмір волокна і довжина хвилі. Важливо відзначити, що визначення n_{eff} пов'язане зі зміною фази на одиницю довжини вздовж волокна, а не з розподілом інтенсивності мод [8].

2.6 Волокна з градієнтним індексом

Волокна з градієнтним індексом (Gradient-Index або GI) є особливим типом оптичних волокон, в яких показник заломлення змінюється поступово від центра до периферії. Таке градієнтне середовище дозволяє світлу розповсюджуватися вздовж волокна більш ефективно, що знижує втрати і дисперсію сигналу.

Основні характеристики волокон з градієнтним індексом

1. Показник заломлення є найвищим у центрі серцевини волокна і плавно зменшується до оболонки. Це досягається шляхом додавання різних домішок до скла під час виробництва волокна.

2. Завдяки плавній зміні показника заломлення, різні моди світла, які проходять через волокно, мають схожі швидкості. Це зменшує модову дисперсію, яка є основною причиною «розмивання» сигналу у багатомодових волокнах.

3. Волокна з градієнтним індексом можуть передавати більше даних на більших відстанях порівняно з волокнами зі ступінчастим індексом (step-index fibers).

Типові застосунки волокон з градієнтним індексом характеризуються тим, що:

- висока пропускна спроможність і менша вартість роблять їх популярними для використання у корпоративних та кампусних мережах;
- вони використовуються в ендоскопах та інших медичних інструментах для передачі зображень;
- також використовуються в системах контролю та автоматизації.

Технологія виробництва волокон з градієнтним індексом є складнішою порівняно з виробництвом ступінчастих волокон, але їхні переваги в ефективності передачі даних та зменшенні втрат сигналу виправдовують ці зусилля в багатьох сферах їх застосування.

2.6.1 Структура осердя волокон з градієнтним індексом

У волокнах з градієнтним індексом показник заломлення осердя неперервно зменшується зі збільшенням радіальної відстані r від центра волокна, але, як правило, залишається постійним в оболонці. В основі найчастіше використовуваної конструкції для зміни показника заломлення лежить степенева залежність

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2} & \text{for } 0 \leq r \leq a \\ n_1 (1 - 2\Delta)^{1/2} \approx n_1 (1 - \Delta) = n_2 & \text{for } r \geq a \end{cases}, \quad (2.38)$$

де r – радіальна відстань від осі волокна,

a – радіус осердя,

n_1 – показник заломлення на осі осердя,

n_2 – показник заломлення оболонки,

а безрозмірний параметр α визначає форму профілю показника заломлення. Різниця індексів для волокна з градієнтним індексом задається формулою

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (2.39)$$

Наближення в правій частині цього рівняння зводиться до виразу для волокна зі ступінчастим індексом, заданого рівнянням (2.20). Таким чином, в обох випадках використовується один і той самий символ. Для $\alpha = \infty$ всередині осердя рівняння (2.38) зводиться до ступінчастого індексу профілю $n(r) = n_1$.

2.6.2 Числова апертура волокна GI

Визначення числової апертури (NA) для волокон з градієнтним індексом дійсно є складнішим процесом, ніж для волокон зі ступінчастим індексом. Це пов'язано з тим, що в волокнах з градієнтним індексом показник заломлення змінюється поступово від центра до периферії, і, відповідно, NA залежить від місця поперечного перерізу волокна. У волокнах з градієнтним індексом показник заломлення $n(r)$ змінюється як функція радіальної відстані r від осі волокна. Найчастіше використовується параболічна модель для опису градієнта показника заломлення. Через те, що показник заломлення змінюється поступово, NA також залежить від радіальної позиції в серцевині. Для спрощення розрахунків часто використовують ефективну числову апертуру, яка враховує середню зміну показника заломлення. Таким чином, основна складність у визначенні NA для волокон з градієнтним індексом полягає в тому, що NA змінюється по всьому поперечному перерізу серцевини волокна, тоді як у волокнах зі ступінчастим індексом NA є постійною величиною. Це робить розрахунки і моделювання оптичних властивостей волокон з градієнтним індексом більш складними, але водночас забезпечує

переваги в ефективності передачі даних. Геометрична оптика показує, що світло, яке падає на осердя волокна в позиції r , буде поширюватися як керована мода, тільки якщо воно знаходиться в межах локальної числової апертури $NA(r)$ в цій точці. Локальна числова апертура визначається як [35]

$$NA(r) = \begin{cases} [n^2(r) - n_2^2]^{1/2} \approx NA(0)\sqrt{1 - (r/a)^\alpha} \text{ for } r \leq a, \\ 0 \text{ for } r > a \end{cases}, \quad (2.40)$$

де осьова числова апертура визначається як

$$NA(0) = [n^2(0) - n_2^2]^{1/2} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}. \quad (2.41)$$

Так NA волокна з градуйованим індексом зменшується від $NA(0)$ до нуля, коли r рухається від осі волокна до межі осердя і оболонки. Порівняння числових апертур для волокон з різними профілями α показано на рис. 2.23.

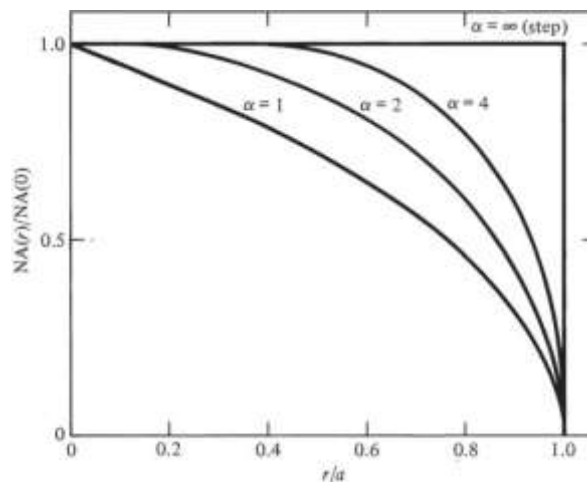


Рисунок 2.23 – Порівняння числових апертур для волокон з різними профілями індексу осердя

Кількість зв'язаних мод у волокні з градуйованим індексом становить

$$M_g = \frac{\alpha}{\alpha + 2} a^2 k^2 n_1^2 \Delta \approx \frac{\alpha}{\alpha + 2} \frac{V^2}{2}, \quad (2.42)$$

де $k = 2\pi/\lambda$, та праве наближення отримано за допомогою рівнянь (2.23) і (2.27).

Виробники волокон зазвичай вибирають параболічний профіль показника заломлення, який задається $\alpha = 2.0$. У цьому випадку $M_g = V^2/4$, що вдвічі менше, ніж кількість мод, підтримуваних волокном зі ступінчастим індексом (для якого $\alpha = \infty$), що має таке ж значення V .

Приклад 2.16 Розглянемо волокно зі ступінчастим індексом та діаметром осердя 50 мкм, яке має параболічний профіль показника заломлення ($\alpha = 2$). Якщо волокно має числову апертуру $NA = 0.22$, яка загальна кількість напрямлених мод на довжині хвилі 1310 нм ?

Розв'язання. По-перше, з рівняння (2.27)

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA = \frac{2\pi \times 25 \mu m}{1.31 \mu m} 0.22 = 26.4 .$$

Тоді з рівняння (2.42) загальна кількість мод для $\alpha = 2$ дорівнює

$$M_g = \frac{\alpha}{\alpha + 2} \frac{V^2}{2} = \frac{V^2}{4} = 174 .$$

Як приклад наведемо лістинг програми мовою Python для визначення значення нормованої частоти та кількості напрямлених мод на довжині хвилі 1310 нм для волокна зі ступінчастим індексом та діаметром осердя 50 мкм, яке має параболічний профіль показника заломлення ($\alpha = 2$) та числову апертуру $NA = 0.22$.

```
import math
# Вхідні дані
diameter = 50e-6 # діаметр осердя в метрах (50 мкм)
radius = diameter / 2 # радіус осердя
wavelength = 1310e-9 # довжина хвилі в метрах (1310 нм)
NA = 0.22 # числова апертура
# Обчислення нормованої частоти V
V = (2 * math.pi * radius / wavelength) * NA
# Обчислення кількості мод
M = (V**2) / 4
# Виведення результатів
print(f"Нормована частота V: {V:.2f}")
print(f"Кількість напрямлених мод M: {M:.2f}")
### Пояснення програми:
```

1. ****Вхідні дані****: Вказуються такі параметри волокна, як діаметр осердя, довжина хвилі та числова апертура.

2. ****Обчислення****: Програма обчислює радіус осердя, нормовану частоту V за формулою та кількістю мод M.

3. ****Виведення результатів****: Виводяться значення нормованої частоти та кількості мод на екран.

Нормована частота V: 26.38

Кількість напрямлених мод M: 173.97

**** Process exited - Return Code: 0 ****

Press Enter to exit terminal

2.6.3 Умови відсікання у волокнах GI

Подібно до волокон зі ступінчастим індексом, для усунення інтермодальної дисперсії волокна зі ступінчастим індексом можуть бути спроектовані як одномодові волокна, в яких тільки основна мода може поширюватися на потрібній робочій довжині хвилі. Емпіричний вираз параметра V , за якого відсікається мода другого найнижчого порядку, мода L_{11} для волокон з градуйованим індексом має вигляд [3].

$$V = 2.405 \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha}}. \quad (2.43)$$

Рівняння (2.43) показує, що в загальному випадку для волокна з градуйованим індексом значення V зменшується зі збільшенням α . Воно також показує, що критичне значення V за умови зрізу для параболічних волокон з градуйованим індексом в $\sqrt{2}$ рази більше, ніж для волокон зі ступінчастим індексом аналогічного розміру. Крім того, з визначення V , наведеного в рівнянні (2.27), впливає, що числова апертура волокна з градуйованим індексом більша, ніж у волокна зі ступінчастим індексом порівнянного розміру.

2.7 Матеріали оптичних волокон

Вибираючи матеріали для оптичних волокон дійсно потрібно враховувати кілька ключових вимог, які забезпечують їх ефективність і надійність. Матеріал для оптичних волокон має дозволяти виробництво тонких ниток, які можуть бути дуже гнучкими, щоб їх можна було укласти в різні конфігурації без ризику зламання. Важливо, щоб матеріал мав низькі оптичні втрати на робочій довжині хвилі, що забезпечує ефективне перенесення світла на великі відстані. Це дозволяє зменшити потребу в повторних підсилювачах сигналу в системах зв'язку. Щоб створити ефективну структуру волокна потрібно, щоб матеріали для осердя та оболонки мали різні показники заломлення. Це дозволяє світлу, яке поширюється через осердя, залишатися всередині завдяки явищу повного внутрішнього відбиття. Матеріали мають бути стійкими до впливу вологи, температурних змін і механічних навантажень, щоб забезпечити тривалу експлуатацію волокон в різних умовах. Висока прозорість матеріалів у потрібному спектрі є критично важливою для зменшення розсіювання та поглинання світла. Економічна доцільність матеріалів і їх обробки також відіграє важливу роль у виробництві оптичних волокон. Вибрані матеріали мають піддаватися обробці за допомогою таких сучасних технологій, як екструзія чи волокноутворення. Деякі специфічні

застосунки можуть потребувати налаштування оптичних характеристик, тому бажано, щоб матеріали могли бути легко модифіковані.

Скло (наприклад, кремнієве скло) та пластмаси (такі як полімери) є основними матеріалами, що відповідають цим вимогам, завдяки своїм унікальним властивостям, які роблять їх придатними для широкого спектра застосунків у волоконно-оптичних системах. Скло та пластмаси, зокрема полімерні матеріали, дійсно є найбільш поширеними варіантами для виготовлення оптичних волокон, оскільки вони здатні задовольнити більшість з цих вимог. Скло забезпечує високу оптичну якість і низькі втрати, тоді як пластмаси можуть бути легшими та більш гнучкими, що робить їх ідеальними за певних вимог.

Скляні волокна, виготовлені з діоксиду кремнію (SiO_2) або силікатного скла, є найбільш поширеними у волоконно-оптичних технологіях завдяки їх відмінним оптичним властивостям. Скляні волокна можуть мати різні характеристики залежно від їх складу та структури. Волокна з помірними втратами, які мають великі осердя, зазвичай використовуються для локальних мереж або в системах, де важлива коротка відстань передачі. У той же час, високоякісні волокна з низькими втратами призначені для дальніх передач, наприклад, у міжміських телекомунікаційних мережах. Завдяки своїй структурі скляні волокна можуть забезпечити високу прозорість в межах певного спектра (зазвичай в інфрачервоній області), що веде до мінімальних оптичних втрат. Це є критично важливим для систем, де потрібно передавати дані на великі відстані без значних втрат сигналу.

Пластикові волокна, зазвичай виготовлені з таких полімерних матеріалів, як полістирол або поліметилметакрилат (ПММА), дійсно мають вищий коефіцієнт загасання порівняно зі скляними волокнами. Це обмежує їх використання, переважно, короткими дистанціями (до кількох сотень метрів). Однією з головних переваг пластикових волокон є їх механічна міцність і стійкість до впливів навколишнього середовища. Це робить їх ідеальними для використання в умовах, де є ризик механічних пошкоджень, наприклад, у промислових або будівельних умовах. Пластикові волокна часто використовуються для підключень у домашніх умовах, в автомобільній промисловості, а також у системах, що вимагають гнучкості та простоти в процесі встановлення. Вони можуть бути корисні для відео- і аудіосигналів, а також у системах, що потребують високої швидкості передачі даних на короткі дистанції. Отже, вибір між скляними та пластиковими волокнами залежить від конкретних вимог застосування, беручи до уваги відстань передачі, середовище експлуатації, вартість та потрібні оптичні характеристики.

2.7.1 Скляні оптичні волокна

Скло виготовляється шляхом плавлення сумішей оксидів, сульфідів або селенідів металів. У результаті цього процесу утворюється матеріал з хаотично з'єднаною молекулярною мережею, що відрізняє його від

кристалічних матеріалів, які мають впорядковану структуру. Одним із наслідків такого випадкового порядку є те, що скло не має чітко визначеної температури плавлення. При нагріванні скла від кімнатної температури воно залишається твердим до кількох сотень градусів за Цельсієм. З подальшим підвищенням температури скло поступово починає розм'якшуватися, а при дуже високих температурах перетворюється на в'язку рідину. Термін «температура плавлення» часто використовується у виробництві скла і стосується розширеного діапазону температур, в якому скло стає достатньо рідким, щоб швидко звільнитися від бульбашок газу.

Найбільшою категорією оптично прозорого скла, що використовується для виготовлення оптичних волокон, є оксидні скла. Найпоширенішим з них є діоксид кремнію (SiO_2), який має показник заломлення в межах від 1,458 при довжині хвилі 850 нм до 1,444 при 1550 нм. Для отримання двох матеріалів з різними показниками заломлення для осердя і оболонки використовують або фтор, або різні оксиди, які є легуючими домішками. До таких домішок належать B_2O_3 (борний оксид), GeO_2 (германій діоксид) та P_2O_5 (фосфорний оксид), які додаються до кремнезему. Це дозволяє налаштовувати оптичні властивості скла, що є важливим для ефективної роботи оптичних волокон. Як показано на рис. 2.24, додавання GeO_2 або P_2O_5 збільшує показник заломлення, тоді як легування кремнезему фтором або B_2O_3 зменшує його. Тому оболонка має мати нижчий показник, ніж осердя, прикладами композицій волокон є

- GeO_2 – SiO_2 осердя; SiO_2 оболонка
- P_2O_5 – SiO_2 осердя; оболонка SiO_2
- SiO_2 осердя; B_2O_3 – SiO_2 оболонка
- GeO_2 – B_2O_3 – SiO_2 –осердя; B_2O_3 – SiO_2 – оболонка.

Тут позначення GeO_2 – SiO_2 , наприклад, позначає кварцове скло, леговане GeO_2 .

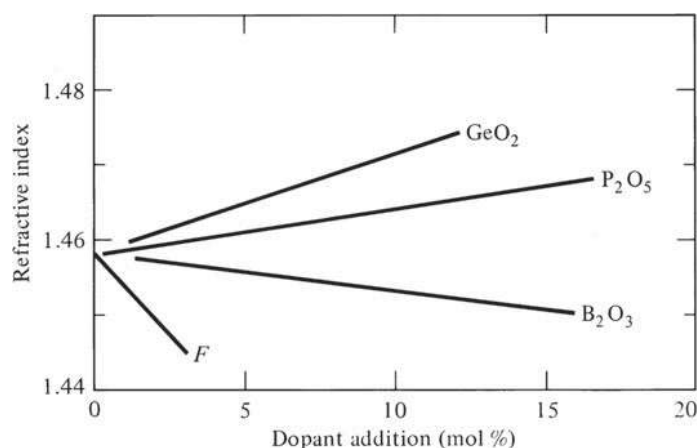


Рисунок 2.24 – Зміна показника заломлення залежно від концентрації легування в кварцовому склі

Основною сировиною для отримання кремнезему є пісок високої чистоти. Скло, що складається з чистого кремнезему, називається асилікатним склом, плавленим кремнеземом або склоподібним кремнеземом. Це матеріал характеризується низкою бажаних властивостей, які роблять його ідеальним для використання в різних сферах, зокрема в оптичних технологіях. Серед його ключових характеристик варто відзначити:

- стійкість до деформації при температурах до 1000 °C, що робить його придатним для використання в екстремальних умовах;
- висока стійкість до руйнування від теплового удару завдяки низькому тепловому розширенню, що мінімізує ризик тріщин при різких змінах температури;
- добра хімічна стійкість, що забезпечує тривале використання в агресивних середовищах;
- висока прозорість як у видимій, так і в інфрачервоній областях, що є важливим фактором для волоконно-оптичних систем зв'язку. Ці властивості роблять асилікатне скло важливим компонентом у процесі розвитку та вдосконалення волоконно-оптичних технологій.

2.7.2 Традиційні технології виготовлення оптичних волокон

Для виготовлення оптичних хвилеводів використовуються два основні методи: парофазне окислення та метод прямого розплавлення. Цей метод відповідає традиційним процедурам виготовлення скла. Оптичні волокна виготовляються безпосередньо з розплавленого стану очищених компонентів силікатного скла. Процес є порівняно простим і дозволяє отримувати високу якість волокон. У процесі парофазного окислення високочисті пари галогенідів металів, таких як SiCl_4 (дихлорид кремнію) і GeCl_4 (дихлорид германію), реагують з киснем, утворюючи білий порошок частинок SiO_2 . Ці частинки збираються на поверхні сипучого скла через один з чотирьох широко використовуваних процесів. Потім вони спікаються (перетворюються на однорідну скляну масу шляхом нагрівання без розплавлення) за допомогою різних методик. Як наслідок утворюється прозорий скляний стрижень або трубка, залежно від обраного процесу. Цей стрижень або трубка називається преформою, яка зазвичай має діаметр від 10 до 25 мм і довжину від 60 до 120 см. Преформи є важливими елементами для подальшого виготовлення оптичних волокон, оскільки вони визначають їхні оптичні властивості. Волокна виготовляються з преформи [39] за допомогою обладнання, показаного на рис. 2.25.

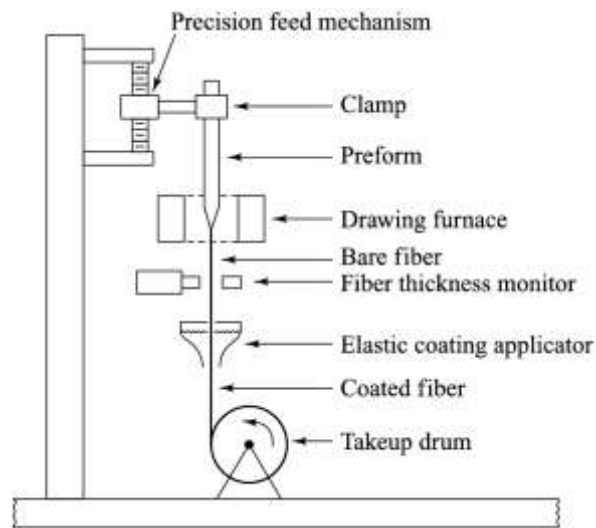


Рисунок 2.25 – Схема пристрою для витягування волокон

Преформа подається в круглий нагрівач, відомий як витяжна піч. У цій пічці кінець преформи розм'якшується до такого стану, що його можна витягнути в дуже тонку нитку, яка стає оптичним волокном.

Швидкість обертання приймального барабана в нижній частині витяжної башти визначає швидкість витягування волокна. Ця швидкість, зі свого боку, впливає на товщину отриманого волокна, тому важливо підтримувати точну швидкість обертання. Щоб контролювати товщину оптичного волокна використовується монітор, який працює в контурі зворотного зв'язку, що дозволяє регулювати швидкість витягування в реальному часі.

Для захисту оголеного скловолокна від таких зовнішніх забруднень, як пил і водяна пара, на волокно відразу після його витягування наноситься еластичне покриття. Це покриття є важливим для забезпечення довговічності та надійності оптичних волокон, оскільки воно запобігає пошкодженням і зберігає їхні оптичні характеристики.

2.7.3 Оптичні волокна з модифікованого скла

Включення рідкісноземельних елементів (атомні номери 57–71) у звичайне пасивне скло надає нові оптичні і магнітні властивості матеріалу. Ці нові характеристики дозволяють матеріалу здійснювати підсилення, послаблення та фазову затримку світла, що проходить через нього. Легування (додавання домішок) може бути застосоване до різних типів скла, охоплюючи кремнеземне, телуридне та галогенідне. Серед легувальних матеріалів, які використовуються для волоконних лазерів, двома найпоширенішими є ербій (Er) і неодим (Nd). Вони відіграють важливу роль у підвищенні ефективності та продуктивності лазерних систем завдяки своїм унікальним оптичним властивостям, що дозволяє досягати високих рівнів посилення світла.

Іонні концентрації рідкісноземельних елементів у легуваному склі зазвичай є низькими, в межах 0,005–0,05 моль %, щоб уникнути ефекту кластеризації, який може негативно впливати на оптичні властивості

матеріалу. Для використання спектрів поглинання та флуоресценції рідкісноземельних елементів можна застосувати оптичне джерело, яке випромінює на довжині хвилі, що відповідає поглинанню легувального матеріалу. Це джерело збуджує електрони в рідкісноземельних допантах, підвищуючи їх до вищих енергетичних рівнів. Коли збуджені електрони повертаються на нижчі енергетичні рівні, вони випромінюють світло в вузькому оптичному спектрі на довжині хвилі флуоресценції. Цей процес є основою для створення лазерного випромінювання та інших оптичних ефектів, що використовуються в різних технологіях, зокрема в волоконних лазерах та оптичних сенсорах.

2.7.4 Пластикові оптичні волокна

Зростаючий попит на високошвидкісні послуги безпосередньо на робочій станції спонукав розробників волокон до створення високошвидкісних полімерних оптичних волокон з градуйованим індексом (POF) для використання на території замовника. Основними матеріалами для осердя таких волокон є поліметилметакрилат (PMMA) або перфторований полімер, що приводить до відповідного позначення: PMMA POF і PFPOF.

Хоча пластикові волокна демонструють значно більше загасання оптичного сигналу порівняно зі скляними волокнами, вони мають свої переваги, такі як міцність і довговічність. Наприклад, модуль еластичності цих полімерів майже на два порядки нижчий, ніж у кремнезему, що робить POF з градуйованим індексом діаметром 1 мм достатньо гнучким для встановлення в звичайних волоконно-оптичних кабелях.

Стандартні оптичні з'єднувачі можуть бути використані з пластиковими волокнами, якщо їх діаметр осердя сумісний з діаметром осердя стандартних багатомодових скляних телекомунікаційних волокон. Це дозволяє легко з'єднувати пластикові і скляні волокна однакового розміру. Крім того, для виготовлення конекторів, з'єднувачів і приймально-передавальних пристроїв для пластикових волокон можна використовувати недорогі технології лиття під тиском, що робить їх виробництво економічно вигідним.

У таблиці 2.4 наведено зразки характеристик полімерних оптичних волокон PMMA POF і PF POF.

Таблиця 2.4 – Характеристики зразків полімерних оптичних волокон PMMA POF і PF POF

Characteristic	PMMAPOF	PFPOF
Core diameter	0.4 mm	0.050–0.30 mm
Cladding diameter	1.0 mm	0.25–0.60 mm
Numerical aperture	0.25	0.20
Attenuation	150 dB/km at 650 nm	<40 dB/km at 650–1300 nm
Bandwidth	2.5 Gb/s over 200 m	2.5 Gb/s over 550 m

2.8 Концепції фотонних кристалічних волокон

На початку 1990-х років дослідники передбачили і продемонстрували нову структуру оптичного волокна, яке спочатку називалося дірчастим, а пізніше отримало назву фотонне кристалічне волокно (ФКВ) або мікроструктуроване волокно. Основна різниця між цією новою структурою і звичайними волокнами полягає в тому, що оболонка, а в деяких випадках і осердя ФКВ, містить повітряні отвори, які проходять по всій довжині волокна.

У традиційних оптичних волокнах характеристики пропускання світла визначаються матеріалом осердя та оболонки. Натомість у фотонних кристалічних волокнах структурне розташування отворів і каналів створює внутрішню мікроструктуру, яка надає можливість додаткового управління оптичними властивостями світла. Це відкриває нові перспективи у контролі дисперсії, нелінійності та подвійного променевого заломлення в оптичних волокнах. Завдяки цим властивостям ФКВ можуть бути використані в різноманітних застосунках, охоплюючи нелінійну оптику, оптичні сенсори та системи зв'язку з високою пропускнуою спроможністю.

Розміри отворів і відстань між ними, відома як крок, у мікроструктурі, а також показник заломлення матеріалу, з якого складається волокно, визначають світлопровідні характеристики фотонних кристалічних волокон (ФКВ). Існують дві основні категорії ФКВ: індексно-напрямні волокна та фотонні смугові волокна. У індексно-напрямних волокнах механізм передачі світла подібний до того, що спостерігається у звичайних оптичних волокнах. Вони мають осердя з високим показником заломлення, оточене оболонкою з низьким показником заломлення. Однак у фотонних кристалічних волокнах ефективний показник заломлення оболонки залежить не лише від матеріалу, а й від довжини хвилі, розміру та кроку отворів. Це дає можливість налаштувати властивості волокна для специфічних застосунків. На відміну від індексно-напрямних волокон, у фотонних смугових волокнах світло спрямовується за допомогою ефекту фотонної забороненої зони, який виникає в порожнистому або мікроструктурованому осерді, оточеному мікроструктурованою оболонкою. Це створює особливі умови для управління світловими хвилями, що дозволяє досягати таких унікальних оптичних властивостей, як висока нелінійність, контрольована дисперсія та можливість передачі світла в широкому діапазоні довжин хвиль. Такі характеристики роблять фотонні кристалічні волокна перспективними для використання в різних технологіях, зокрема в оптичних комунікаціях, сенсорах, нелінійній оптиці та квантовій технології.

2.8.1 Індексно-напрямне фотонне кристалічне волокно

Індексно-напрямне фотонне кристалічне волокно (ІН ФКВ) є одним з двох основних типів фотонних кристалічних волокон. Як і звичайні оптичні волокна, ІН ФКВ має осердя з високим показником заломлення,

яке оточене оболонкою з нижчим показником заломлення. Проте, на відміну від традиційних волокон, у ІН ФКВ використовується мікроструктурована оболонка, що містить повітряні отвори, які проходять по всій довжині волокна. Це створює унікальну внутрішню структуру, яка впливає на його оптичні властивості.

Основні характеристики індексно-напрямого фотонного кристалічного волокна

1. Світло в ІН ФКВ передається за рахунок принципу тотального внутрішнього відбиття, аналогічного звичайним оптичним волокнам. Високий показник заломлення осердя сприяє утриманню світла всередині волокна.

2. Ефективний показник заломлення оболонки в ІН ФКВ може змінюватися залежно від довжини хвилі світла. Це відкриває можливості для налаштування волокна під конкретні оптичні застосування.

3. Розміри і розташування повітряних отворів в оболонці можуть бути змінені для оптимізації таких характеристик волокна, як дисперсія і нелінійність. Це дозволяє досягати кращих показників для конкретних застосунків.

4. ІН ФКВ забезпечує високу якість передачі сигналу, знижене загасання, а також можливість досягнення специфічних оптичних властивостей, що робить їх придатними для використання в оптичних комунікаціях, сенсорах та інших високотехнологічних застосуваннях.

5. Використовується в системах волоконно-оптичного зв'язку, нелінійній оптиці, а також у розробці таких нових оптичних пристроїв, як лазери та генератори.

Індексно-напряме фотонне кристалічне волокно є важливим кроком у розвитку оптичних технологій, надаючи нові можливості для управління світлом і створення інноваційних рішень у різних галузях. На рис. 2.26 показано двовимірний поперечний переріз базової структури індексного скловолокна.

Волокна з твердим осердям, оточеним оболонкою, що містить повітряні отвори, є характерними для індексно-напрямних фотонних кристалічних волокон (ІН ФКВ). Ці повітряні отвори проходять по всій довжині волокна і можуть мати різноманітні форми, розміри та схеми розподілу, що суттєво впливає на оптичні властивості волокна. Як ілюстрація, на рис. 2.26 повітряні отвори розташовані в рівномірному шестикутному масиві. Всі отвори мають певний діаметр і відстань між отворами, або крок Λ . Значення діаметра отвору і кроку є важливими для визначення експлуатаційних характеристик РСФ з індексною напрямною. У випадку співвідношення діаметра до кроку $d/\Lambda < 0,4$ волокно демонструє одномодові властивості в широкому діапазоні довжин хвиль (приблизно від 300 до 2000 нм). Ця характеристика не може бути досягнута в стандартних оптичних волокнах і є корисною для одночасної передачі декількох довжин хвиль по одному волокну.

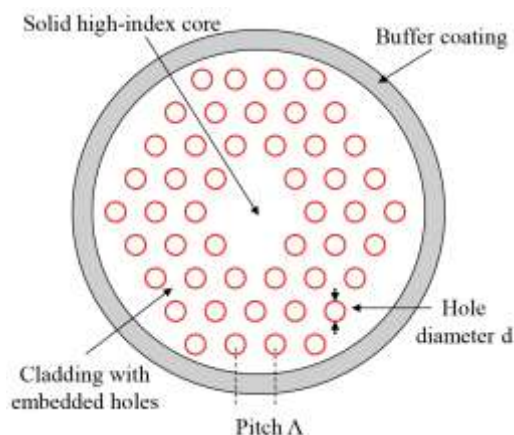


Рисунок 2.26 – Поперечний переріз структури індексно-напрямого фотонного кристалічного волокна з повітряними отворами однакового розміру

Хоча осердя і оболонка в РСФ виготовлені з одного і того ж матеріалу (наприклад, чистий діоксид кремнію), повітряні отвори знижують ефективний показник заломлення, оскільки $n = 1,00$ для повітря і $1,45$ для кремнезему. Велика різниця в показниках заломлення разом з малими розмірами мікроструктур призводить до того, що ефективний показник заломлення сильно залежить від довжини хвилі. Той факт, що осердя може бути виготовлене з чистого діоксиду кремнію, дає РСФ низку експлуатаційних переваг порівняно зі звичайними волокнами, які зазвичай мають осердя з легованого германієм кремнезему. До них відносять дуже низькі втрати, здатність передавати високі рівні оптичної потужності і високу стійкість до потемніння під дією ультрафіолету. Волокна можуть підтримувати одномодовий режим роботи в діапазоні довжин хвиль від 300 нм до понад 2000 нм . Площа модового поля РСФ може перевищувати 300 мкм^2 порівняно з 80 мкм^2 у звичайних одномодових волокон. Це дозволяє РСФ передавати високі рівні оптичної потужності без виникнення нелінійних ефектів, характерних для стандартних волокон.

2.8.2 Оптичне волокно з фотонною смугою пропускання

Фотонно-смугові (PBG) волокна дійсно використовують принципи фотонної забороненої зони для управління світловими хвилями, і вони мають кілька ключових характеристик, які відрізняють їх від традиційних оптичних волокон.

Основні характеристики PBG-волокон

1. Двовимірна фотонна заборонена зона виникає через впорядковане розташування повітряних отворів в оболонці волокна. Вона блокує поширення світлових хвиль у певному діапазоні частот (долоні хвиль), подібно до того, як періодична кристалічна ґратка в напівпровідниках блокує електрони у забороненій зоні.

2. Обмеження поширення хвиль, що потрапляють у цю заборонену зону, оскільки їх показник заломлення в цій області нижчий, ніж у

навколишньому матеріалі. Це дозволяє світлу залишатися в межах певних ділянок, які не підпадають під дію фотонної забороненої зони.

3. У традиційних PBG-волокнах пустотіле осердя служить дефектом у структурі фотонної забороненої зони. Цей дефект створює ділянку, де світло може поширюватися, забезпечуючи можливість передачі інформації.

4. У той час як звичайні індексно-напрямні волокна дозволяють світлу поширюватися на всіх довжинах хвиль, PBG-волокна мають відносно вузьку ділянку довжин хвиль (приблизно 100–200 нм), в якій направлене світло може проходити. Це забезпечує точніший контроль над спектром переданого сигналу.

Переваги PBG-волокон

- Завдяки вузькому діапазону пропускання, PBG-волокна можуть бути використані для специфічних застосунків у оптичних комунікаціях, де важливий контроль над довжинами хвиль.

- Завдяки своїй структурі, PBG-волокна можуть забезпечувати знижене загасання сигналу, що робить їх ефективними для довгих дистанційних передач.

- Вони можуть бути використані в оптичних сенсорах, нелінійній оптиці, лазерах та інших пристроях, що вимагають високого рівня контролю над світлом.

PBG-волокна активно застосовуються в:

- оптичних комунікаційних системах, що вимагають високої пропускної спроможності та точного контролю за спектром;

- нелінійній оптиці, де потрібно взаємодіяти з різними частотами світла;

- сенсорах, які використовують зміну спектральних характеристик для детекції змін у навколишньому середовищі.

Фотонно-смужкові волокна є важливим кроком у розвитку оптичних технологій, пропонуючи нові можливості для управління світлом і створення інноваційних рішень у різних сферах. На рисунку 2.27 показано поперечний переріз структури PBG-волокна.

Великі центральні порожнисті осердя, що утворюються в PBG-волокнах шляхом видалення матеріалу з ділянки, яка може бути зайнята сімома повітряними отворами, є основною характеристикою, що визначає їхні унікальні оптичні властивості. Ці волокна, відомі як повітряно-напрямні або порожнисті світловоди PBG, мають низку переваг, які роблять їх привабливими для різноманітних застосунків.

Основні характеристики PBG-волокон:

1. Завдяки своїй порожнистій структурі, близько 98% потужності в керованих режимах поширюється в ділянках, які містять повітряні отвори. Це означає, що світло ефективно залишається в ділянці з нижчим показником заломлення, що забезпечує високу якість передачі сигналу;

2. Отвори в матеріалі оболонки мають визначений діаметр і крок, що впливають на оптичні властивості волокна. Ця структура дозволяє формувати фотонну заборонену зону, яка контролює моди світла, що поширюються в осерді;

3. Порожністі волокна характеризуються дуже низькою нелінійністю, що робить їх ідеальними для застосунків, де важливий контроль над формою і тривалістю імпульсів, таких як дисперсійне імпульсне спотворення;

4. Завдяки своїй конструкції, PBG-волокна можуть витримувати високі оптичні інтенсивності, що є критично важливим для лазерних технологій та інших застосунків, що вимагають потужного світла.

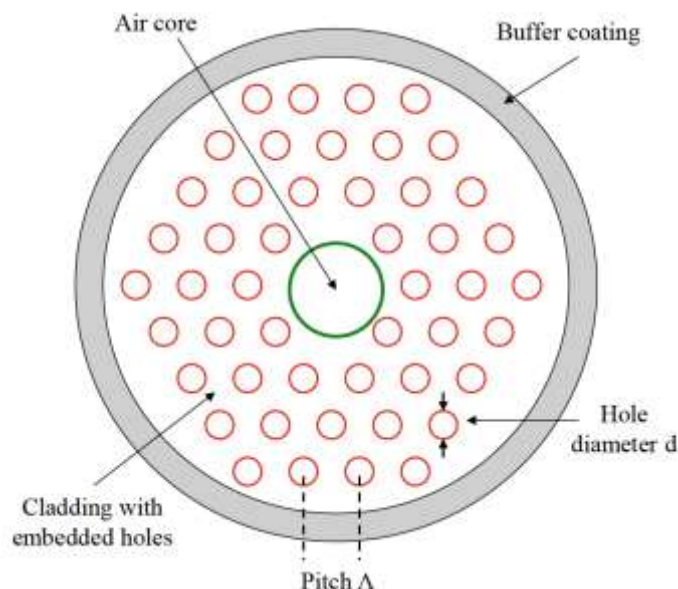


Рисунок 2.27 – Поперечний переріз структури PBG волокна

Застосунки PBG-волокон

1. PBG-волокна можуть бути використані для ущільнення імпульсів, що дозволяє досягати коротших і більш інтенсивних світлових імпульсів. Це має велике значення в лазерних системах та нелінійній оптиці.

2. Завдяки можливості заповнення PBG-волокон газами або рідинами, можна створювати волоконно-оптичні датчики, які реагують на такі зміни в навколишньому середовищі, як тиск, температура або хімічний склад.

3. PBG-волокна можуть бути використані для створення атенюаторів, які дозволяють регулювати рівень оптичної потужності, що передається через них. Це особливо важливо для систем оптичного зв'язку та вимірювання.

Таким чином, PBG-волокна є перспективною технологією, що пропонує унікальні можливості для розвитку оптичних систем і приладів завдяки своїй структурі та властивостям.

2.9 Волоконно-оптичні кабелі

Впроваджуючи технології оптичних хвилеводів у практичні застосунки важливо враховувати, що волокна мають бути інтегровані в специфічні кабельні конструкції. Це впливає на їхню ефективність та надійність залежно від умов експлуатації. Наведемо основні аспекти, що стосуються проектування та виготовлення оптоволоконних кабелів:

Види кабельних конструкцій

1. Підземні кабелі зазвичай мають додатковий захист від механічних пошкоджень, вологи та корозії. Вони можуть бути оснащені армованими оболонками для витримування тиску ґрунту. Використовуються спеціальні матеріали, що забезпечують герметичність і стійкість до агресивних умов.

2. Внутрішньобудівельні кабелі зазвичай легші за підземні, оскільки їх не піддають таким суворим умовам. Вони можуть містити менше захисних шарів. Часто використовують для прокладання в стінах, стелях або підлогах, тому важливо забезпечити гнучкість і простоту монтажу.

3. Конструкція кабелів для зовнішніх опор має витримувати ультрафіолетове випромінювання, дощі та вітрові навантаження. Застосовуються матеріали, що запобігають старінню та руйнуванню під впливом навколишнього середовища.

4. Кабелі, що закопуються в землю потребують захисту від механічних навантажень і вологи, тому часто мають спеціальні водонепроникні оболонки. Часто використовуються армовані конструкції для забезпечення тривалої служби.

5. Підводні кабелі мають бути герметичними і здатними витримувати високий тиск води. Використовуються матеріали, які запобігають корозії та механічним пошкодженням.

Усі типи кабелів мають бути спроектовані так, щоб забезпечити максимальний захист волокон від зовнішніх впливів. Особлива увага приділяється герметичності, особливо для кабелів, які можуть піддаватися впливу вологи. Виробники прагнуть, щоб оптоволоконні кабелі можна було прокладати за допомогою стандартного монтажного обладнання та методів, які використовуються для звичайних дріт'яних кабелів. Важливо враховувати вплив температурних коливань на матеріали, з яких виготовлено волокно та кабель.

Проектування оптоволоконних кабелів вимагає ретельного підходу, щоб забезпечити їхню ефективність і надійність у різних умовах експлуатації. Спеціальні конструкції, адаптовані до конкретних умов, дозволяють максимально використовувати переваги оптичних волокон, зберігаючи при цьому простоту монтажу та експлуатації.

2.9.1 Структури волоконно-оптичних кабелів

Максимально допустиме осьове навантаження на оптичні кабелі є критично важливим параметром, оскільки воно визначає, яку довжину кабелю можна надійно прокладати без ризику пошкодження. Цей показник особливо важливий для планування та монтажу кабельних систем у різних умовах.

Порівняння механічних властивостей

1. У мідних кабелях дроти зазвичай виконують роль основних несучих елементів. Вони можуть витримувати значні осьові навантаження, зокрема, подовження до 20% без руйнування. Це дозволяє мідним кабелям бути досить гнучкими в умовах монтажу, оскільки вони можуть адаптуватися до змін у конфігурації без ризику пошкодження.

2. Надзвичайно міцні оптичні волокна хоча і мають підвищену міцність, але все ж можуть ламатися при подовженні в 4%. Це вказує на те, що навіть з покращеними механічними властивостями, оптичні волокна залишаються чутливими до осьових навантажень. Для стандартних волокон, які використовуються в більшості оптичних кабелів, подовження, що призводить до руйнування, становить лише 0,5–1,0%. Це робить їх більш вразливими до механічних навантажень, що вимагає особливої уваги у разі їх монтажу та експлуатації.

Розуміння максимально допустимого осьового навантаження є критично важливим для проектування маршрутів прокладання кабелів. Якщо навантаження перевищує допустимі межі, це може призвести до пошкодження волокон і, відповідно, до зниження ефективності та надійності системи. Під час монтажу оптичних кабелів потрібно дотримуватися певних методів, щоб уникнути перевантаження, зокрема використання відповідних інструментів і технік для розподілу навантаження. Вибір відповідних матеріалів для оболонки та армування кабелю також впливає на його здатність витримувати осьові навантаження. Використання міцних і легких матеріалів може суттєво підвищити загальну надійність кабелю.

Максимально допустиме осьове навантаження є важливою характеристикою, яка відрізняє оптичні волокна від мідних кабелів. Розуміння цих механічних властивостей допомагає інженерам і монтажникам забезпечити надійність й ефективність оптичних систем, що використовуються в різноманітних умовах. Врахування цих факторів під час проектування та монтажу кабелів може запобігти дорогим поломкам і зменшити витрати на обслуговування.

Правильне управління механічними властивостями оптичних волокон є критично важливим не лише у процесі їх виготовлення, а й у процесі прокладання кабелів.

Наведемо кілька ключових аспектів, які потрібно враховувати.

1. Розриви волокна можуть відбуватися швидко, коли напруження понад 40% від допустимого подовження, якщо ж навантаження нижче 20%, розриви відбуваються повільно. Це підкреслює потребу строгого контролю за напруженням у разі виробництва та монтажу.

2. Щоб зменшити ризик пошкодження волокон, подовження у процесі виробництва та прокладання кабелю має бути обмежене до 0,1–0,2%. Це дозволяє уникнути небажаних деформацій, які можуть призвести до зниження оптичної якості або навіть до руйнування волокна.

Сталевий дріт часто використовується для армування електричних кабелів і може також слугувати підсилювальним елементом для оптичних волоконних кабелів. Він забезпечує механічну підтримку, що зменшує ризик пошкодження волокон у випадку їх прокладання та експлуатації. Для деяких застосунків, де важливо уникнути впливу електромагнітної індукції або зменшити вагу кабелю, використовуються неметалеві армувальні елементи. Наприклад, такі пластикові елементи, як синтетичні нитки з високою міцністю на розрив, стають популярним вибором. Одним з таких матеріалів є кевлар, м'який, але водночас міцний синтетичний нейлоновий матеріал. Кевлар відомий своєю високою міцністю на розрив, що робить його ідеальним для використання в конструкціях, де потрібна легкість та стійкість до механічних навантажень.

Належна практика виготовлення охоплює ізоляцію волокон від інших компонентів кабелю. Це дозволяє волокнам залишатися близько до нейтральної осі кабелю, що зменшує ризик їхнього пошкодження при згинанні або розтягуванні кабелю. Забезпечення можливості вільного руху волокон під час зміни форми кабелю (згинання або розтягування) є важливим аспектом, оскільки це дозволяє уникнути напруження, яке може призвести до тріщин або розривів.

Управління механічними властивостями оптичних волокон є критично важливим для забезпечення їхньої надійності та довговічності. Використання правильних армувальних матеріалів, обмеження подовження та забезпечення належної ізоляції волокон допомагають зменшити ризики, пов'язані з механічними навантаженнями. Це, зі свого боку, сприяє підвищенню ефективності і надійності оптичних систем, що використовують ці волокна. Загальна конфігурація кабелю, показана на рис. 2.28, ілюструє деякі загальні правила з'єднання, які використовуються в процесі прокладання оптоволоконного кабелю. Окремі волокна або модулі – групи волокон – вільно намотуються навколо центрального буферного міцного елемента.

Структура оптичного кабелю є складною і багат шаровою, що забезпечує надійність і довговічність у процесі експлуатації в різних умовах.

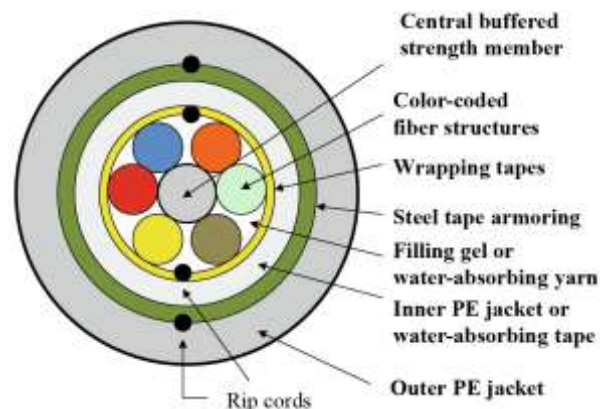


Рисунок 2.28 – Типовий шестиволоконний кабель, що ілюструє деякі поширені матеріали, які використовуються в процесі прокладання оптичних волоконно-оптичних кабелів

Наведемо кілька важливих аспектів, що стосуються компонентів кабелю та їх функцій. Кабельна обмотувальна стрічка, а також такі міцні елементи, як кевлар, використовуються для інкапсуляції і зв'язування груп волокон разом. Це забезпечує структурну цілісність кабелю і допомагає уникнути механічних пошкоджень. Навколо всіх компонентів кабелю розташована міцна поліетиленова оболонка, яка виконує кілька важливих функцій. Оболонка захищає волокна від зовнішніх механічних навантажень, запобігаючи їхньому пошкодженню. Вона також захищає волокна від стирання, вологи, масел, розчинників та інших забруднень, що можуть негативно вплинути на їхні характеристики.

Тип оболонки значною мірою визначає характеристики кабелю. Наприклад, важкі зовнішні кабелі, призначені для прямого прокладання у землі або в повітрі, мають набагато товстішу і міцнішу оболонку порівняно з внутрішніми кабелями, які піддаються меншим навантаженням. Деякі конструкції кабелів можуть містити додаткові мідні дроти для живлення вбудованого обладнання, що робить кабель більш універсальним для різних застосунків. Для підвищення механічної стійкості можуть використовуватися сталеві броньовані стрічки, які забезпечують додатковий захист від фізичних пошкоджень. Використання водонепроникних або водопоглинальних матеріалів допомагає запобігти пошкодженню волокон у разі впливу вологи, що є критично важливим для кабелів, прокладених у вологих умовах. Деякі кабелі оснащені розривними шнурами, які дозволяють легко обрізати оболонку, не пошкоджуючи внутрішні компоненти. Це спрощує процес монтажу та обслуговування. Складна структура оптичних кабелів, що містить різноманітні компоненти, забезпечує їхню надійність та ефективність у процесі експлуатації в різних умовах. Використання таких міцних матеріалів, як кевлар і поліетилен, а також таких додаткових елементів, як мідні дроти та сталева бронь, сприяє підвищенню стійкості кабелів до механічних і зовнішніх впливів. Це робить їх ідеальними для використання в різних сферах, від комунікацій до промислових додатків.

В оптичних кабелях важливим аспектом є правильна ідентифікація окремих волокон, що забезпечується кольоровим кодуванням. Це допомагає легко розрізняти волокна у разі монтажу та обслуговування. Розглянемо детальніше основні принципи кольорового кодування, структури волоконно-оптичних кабелів і їх характеристики. Документ TIA-598-D визначає загальний набір з дванадцяти основних кольорів для позначення окремих волокон у кабелях. Кожне волокно в групі має свій унікальний колір оболонки, що полегшує ідентифікацію та монтаж. Якщо в кабелі є кілька груп волокон, кольори оболонки кожної групи відповідають одній і тій же стандартній схемі кольорового кодування, що забезпечує уніфікацію і зручність у використанні. Кабелі зі щільною буферизацією зазвичай використовуються для внутрішніх ліній передавання. Волокна в таких кабелях мають щільну буферизацію, що

забезпечує додатковий захист від механічних навантажень і зовнішніх впливів. Використання щільної буферизації дозволяє зменшити вартість й спростити монтаж, оскільки ці кабелі більш легкі і гнучкі. Конфігурація кабелю з вільною трубкою призначена для передачі даних на великі відстані і зазвичай використовується в зовнішніх умовах. Вільна трубка дозволяє волокнам вільно рухатися всередині оболонки, що зменшує ризик пошкодження у разі розтягнення чи згинання. Структура з вільними трубками також забезпечує кращу стійкість до впливу навколишнього середовища, серед них вологість і температурні коливання. Стрічковий кабель є вдосконаленням кабелю зі щільною буферизацією. Він може мати покращені характеристики гнучкості та стійкості до механічних навантажень, що робить його ідеальним для специфічних застосунків.

У всіх типах волоконно-оптичних кабелів волокна складаються зі звичайного скляного осердя, яке оточене оболонкою. Ця конструкція забезпечує передачу світла з мінімальними втратами. Захисне покриття має діаметр 250 мкм, що надає додатковий захист волокну від механічних впливів і забруднень, а також покращує його експлуатаційні характеристики. Кольорове кодування та структура волоконно-оптичних кабелів відіграють важливу роль у забезпеченні їх надійності та зручності використання. Стандарти, такі як TIA-598-D, допомагають уніфікувати процеси монтажу та обслуговування, в той час як різні конструкції кабелів дозволяють адаптувати їх до специфічних умов експлуатації. Це робить волоконно-оптичні кабелі ідеальними для використання в різноманітних сферах, від комунікацій до промислових додатків. Як показано на рис. 2.29, в конструкції зі щільною буферизацією кожне волокно індивідуально інкапсульоване у власну пластикову буферну структуру діаметром 900 мкм, звідси і назва конструкції з щільною буферизацією.

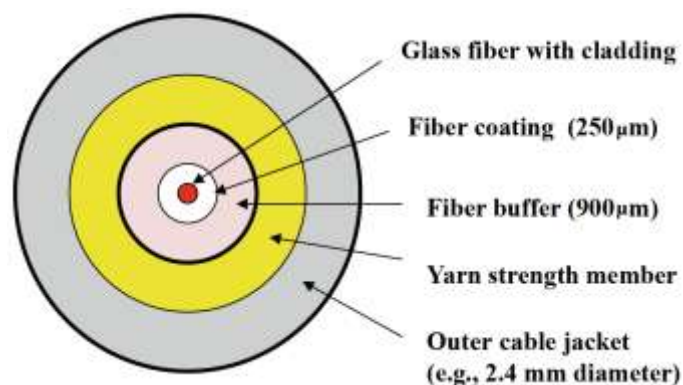


Рисунок 2.29 – Побудова симплексного щільно буферизованого волоконно-оптичного кабельного модуля

Конструкція волоконно-оптичних кабелів зі щільною буферизацією має низку переваг, що роблять їх ідеальними для використання в різних

умовах. Наведемо ключові аспекти, пов'язані з характеристиками та перевагами таких кабелів:

- значно більший розмір буфера діаметром 900 мкм порівняно з захисним покриттям (товщина 250 мкм). Таке співвідношення забезпечує додатковий захист волокон від механічних впливів;

- завдяки великому діаметру буфера, кабелі зі щільною буферизацією демонструють високу стійкість до вологості та температурних коливань. Це особливо важливо для зовнішніх застосунків, де кабелі можуть піддаватися впливу несприятливих погодних умов;

- конструкція кабелів дозволяє їх безпосереднє термінування за допомогою роз'ємів. Це спрощує процес монтажу і зменшує кількість етапів, потрібних для підготовки кабелю до використання;

- в одноволоконному модулі навколо волокон розташований шар аромідного матеріалу, який забезпечує додаткову міцність і захист. Аромід (наприклад, кевлар) має високу стійкість до механічних навантажень та температур;

- конфігурація волокон і міцного шару інкапсулюється в оболонку з полівінілхлориду (ПВХ), що забезпечує додатковий захист від механічних пошкоджень, вологості і хімічних впливів. ПВХ є популярним вибором завдяки своїй надійності та довговічності.

Конструкція кабелів зі щільною буферизацією, яка містить 900 мкм буфер, шар міцного аромідного матеріалу та зовнішню оболонку з ПВХ, забезпечує високу надійність та стійкість до різноманітних зовнішніх впливів. Ці характеристики роблять їх ідеальними для використання в умовах, де можуть виникати механічні навантаження, волога та температурні коливання, а також спрощують процес монтажу завдяки можливості прямого термінування. Конфігурація кабелю з вільною трубкою є важливим елементом у конструкції волоконно-оптичних кабелів, особливо в умовах зовнішнього використання. Розглянемо цю конструкцію детально, зосередивши увагу на її характеристиках, перевагах і застосунках. У кабелі з вільною трубкою розміщені одне або кілька волокон, які укладені в термопластичну трубку. Внутрішній діаметр трубки набагато більший за діаметр волокна, що дозволяє волокнам вільно рухатися, зменшуючи ризик їх пошкодження. Волокна в трубці трохи довші, ніж сам кабель. Це забезпечує їх ізоляцію від розтягувальних навантажень, які можуть виникати внаслідок зміни температури, дії вітру або крижаного навантаження. Завдяки цьому волокна не піддаються зайвим механічним напруженням. Трубка заповнюється такими спеціальними матеріалами, як агелор або сухий водонепроникний матеріал. Ці матеріали виконують роль буфера, який дозволяє волокнам вільно переміщатися, а також захищає їх від проникнення вологості всередину трубки, що критично важливо для збереження якості сигналу. Кабель з вільною трубкою зазвичай має сталевий армувальний шар, розташований безпосередньо всередині оболонки. Цей елемент забезпечує

додаткову стійкість кабелю до роздавлювання, а також захищає його від гризунів, що може бути важливим у разі прокладання кабелів у землі або в середовищах, де є ризик пошкодження.

Завдяки своїй конструкції і міцності, кабелі з вільною трубкою можуть бути закопані безпосередньо в землю, що робить їх ідеальними для прокладання в зовнішніх умовах. Такі кабелі також підходять для повітряного прокладання, де їхня стійкість до механічних навантажень і впливу навколишнього середовища є важливою перевагою. Кабелі з вільною трубкою пропонують відмінну надійність і адаптивність для зовнішнього використання завдяки своїй конструкції. Вільний рух волокон, захист від механічних впливів і вологи, а також сталевий армувальний шар роблять їх ідеальними для різноманітних застосунків у сфері зв'язку. Ці характеристики забезпечують довговічність і стабільність роботи кабелів в умовах, де можуть виникати різні механічні навантаження і зовнішні впливи.

Для полегшення експлуатації в польових умовах зрощувальних кабелів, які містять велику кількість волокон, була розроблена волоконно-стрічкова структура. Як показано на рис. 2.30 стрічковий кабель – це розташування волокон, які точно вирівняні один біля одного а потім інкапсульовані в пластиковий буфер або оболонку, утворюючи довгу безперервну стрічку. Кількість волокон у стрічці зазвичай коливається від чотирьох до дванадцяти. Ці стрічки можуть бути накладені одна на одну, утворюючи щільно упаковані волокна (наприклад, 144 волокна) в структурі кабелю.

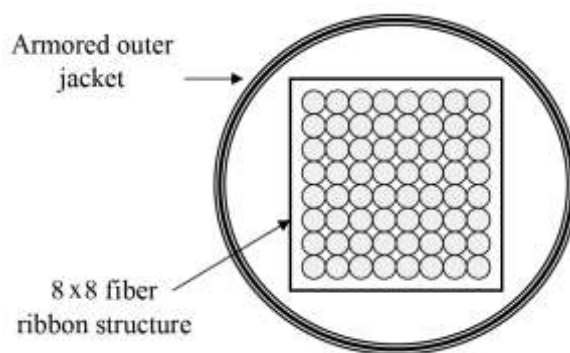


Рисунок 2.30 – Приклад багат шарової стрічкової структури 64-волоконного кабельного модуля

Існує багато різних способів розташування волокон всередині кабелю. Конкретне розташування волокон і сама конструкція кабелю мають враховувати такі питання, як фізичне середовище, послуги, які буде надавати оптичне з'єднання, і будь-яке передбачуване технічне обслуговування і ремонт, які можуть знадобитися.

2.9.2 Конструкції оптичних кабелів для приміщень

Внутрішні кабелі відіграють важливу роль у забезпеченні зв'язку між різними пристроями в приміщеннях. Вони використовуються для передачі

сигналів між офісними користувачами, підключення до принтерів або серверів, а також для коротких патч-кордів у телекомунікаційних стояках. *Розглянемо три основні типи внутрішніх кабелів:*

1. З'єднувальний кабель призначений для легких застосунків усередині приміщень з низьким вмістом волокон. Він часто використовується для оптоволоконних з'єднань, комутаційних шнурів та «точка-точка» з'єднань. З'єднувальний кабель має гнучку, компактну та легку конструкцію, що робить його зручним для використання в різних ситуаціях;

2. Дуплексний кабель є одним з популярних варіантів для внутрішнього використання, дуплексний кабель складається з двох волокон, які захищені оболонкою з ПВХ. Він забезпечує надійну передачу даних, що робить його ідеальним вибором для офісних мереж;

3. Оптоволоконні патч-корди є короткими відрізками (менше 2 м) симплексного або дуплексного кабелю з роз'ємами на обох кінцях, використовуються для підключення обладнання, наприклад, для тестування оптичних сигналів або з'єднання модулів оптичної передачі в стояках;

4. Розгалужувальний кабель складається з 12 волокон зі щільною буферизацією. Він зазвичай використовується у системах з низькою і середньою кількістю волокон, де важливо захистити окремі волокна. Розгалужувальний кабель дозволяє легко встановлювати роз'єми на окремі волокна, що спрощує підключення до різних частин обладнання;

5. Розподільчий кабель складається з окремих або невеликих груп волокон, цей кабель використовується для передачі даних, голосу та відеосигналів у різних мережних додатках. Розподільчі кабелі призначені для використання в кабельних лотках, каналах та конструкціях підвісної стелі, дозволяючи гнучко організовувати розподіл волокон у мережі.

Ці типи кабелів забезпечують ефективну і надійну передачу даних у внутрішніх мережах, що є критично важливим для сучасних офісів та підприємств.

2.9.3 Конструкції оптичних кабелів для зовнішніх застосунків

Зовнішні кабельні інсталяції відіграють важливу роль у забезпеченні зв'язку між будівлями та в передачі даних на великі відстані. Вони охоплюють різні методи прокладання, такі як повітряне, кабельне, пряме та підводне прокладання. Основною характеристикою зовнішніх кабелів є їх нещільна трубчаста конструкція, що забезпечує захист волокон від зовнішніх впливів.

Розглянемо основні типи зовнішніх кабелів

1. Повітряні кабелі призначені для прокладання між будівлями на стовпах або вежах. Вони можуть бути реалізовані в двох основних конструкціях. Самонесучі кабелі містять внутрішній силовий елемент, який дозволяє натягувати кабель між опорами без додаткових механізмів. Це робить їх легшими для монтажу і зменшує потребу в додаткових

підтримувальних конструкціях. Для опорних кабелів спочатку натягується окремий дріт або арматура між опорами, після чого сам кабель прикріплюється до цього елемента. Це забезпечує додаткову стабільність і надійність при прокладанні в умовах, які можуть бути піддані вітровим навантаженням або іншим зовнішнім чинникам.

Кабельне прокладання передбачає використання кабелів, які укладаються в спеціальних каналах або трубах, що забезпечує додатковий захист від механічних пошкоджень і атмосферних впливів. Пряме прокладання – це прокладання кабелів безпосередньо в землі або в інших природних середовищах, де важливо забезпечити максимальний захист від зовнішніх впливів. Підводне прокладання використовується для підключення різних об'єктів, що знаходяться під водою. Цей тип кабелів розроблений для витримування таких підводних умов, як тиск води та корозія.

Зовнішні кабелі доступні в різних конструкціях і розмірах, що дозволяє їх адаптувати до конкретних умов експлуатації та вимог застосування. Це забезпечує надійність і ефективність передачі даних у зовнішніх мережах. Броньований кабель для прямого прокладання або підземного прокладання має один або більше шарів захисної броні зі сталевого дроту або сталеві оболонки під шаром поліетиленової оболонки, як показано на рис. 2.31. Це не тільки забезпечує додаткову міцність кабелю, а й захищає його від таких тварин, як білки або гризуни, які часто спричиняють пошкодження підземних кабелів. Наприклад, у Сполучених Штатах рівнинний кишеньковий ховрах (*Geomys busarius*) може знищити незахищений кабель, який закопаний на глибині менше 2 м (6 футів).

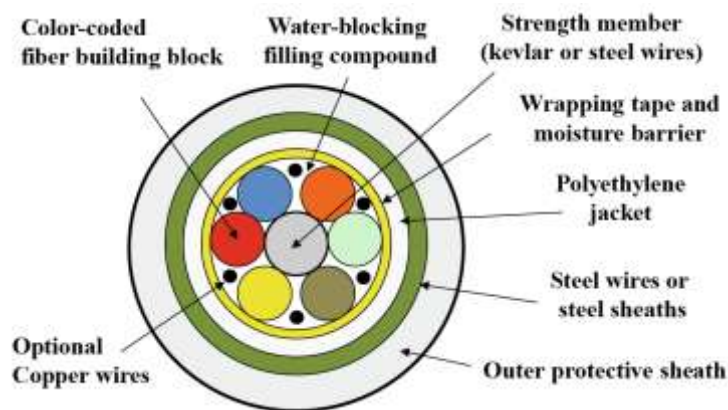


Рисунок 2.31 – Приклад конфігурації броньованого зовнішнього волоконно-оптичного кабелю

Підводний кабель використовується в річках, озерах і океанічних середовищах. Оскільки такі кабелі зазвичай піддаються впливу високого тиску води, до них висуваються набагато жорсткіші вимоги, ніж до підземних кабелів. Наприклад, як показано на рис. 2.32, кабелі, які можна

використовувати в річках і озерах, мають різні водонепроникні шари, одну або кілька захисних внутрішніх поліетиленових оболонок і важку зовнішню броньовану оболонку.

Кабелі, що прокладаються на дні океану, відрізняються особливими конструкційними характеристиками та матеріалами, що забезпечують їхню надійність і ефективність у суворих умовах підводного середовища.

Основні особливості таких кабелів

1. Підводні кабелі мають кілька шарів, які забезпечують механічний захист від таких зовнішніх впливів, як тиск води, морські організми та можливі механічні пошкодження. Зазвичай до їх складу входять:

- захисні оболонки зі спеціальних матеріалів, які стійкі до корозії та зносу;

- армування, яке може містити сталеві або полімерні елементи, що служать для зміцнення кабелю.

2. Для забезпечення електричним струмом занурених оптичних підсилювачів або регенераторів, які використовуються для покращення сигналу на великих відстанях, в конструкції підводних кабелів часто входять мідні дроти. Ці дроти постачають електрику на підводні пристрої, що допомагає підтримувати їх роботу.

3. Оптичні підсилювачі та регенератори є критично важливими для забезпечення стабільної та якісної передачі даних через великі відстані. Вони компенсують втрати сигналу, які можуть виникати у процесі передачі через оптичні волокна.

4. Підводні кабелі також оснащені спеціальними з'єднаннями, які забезпечують герметичність і захист від води, що є важливим для довгострокової експлуатації.

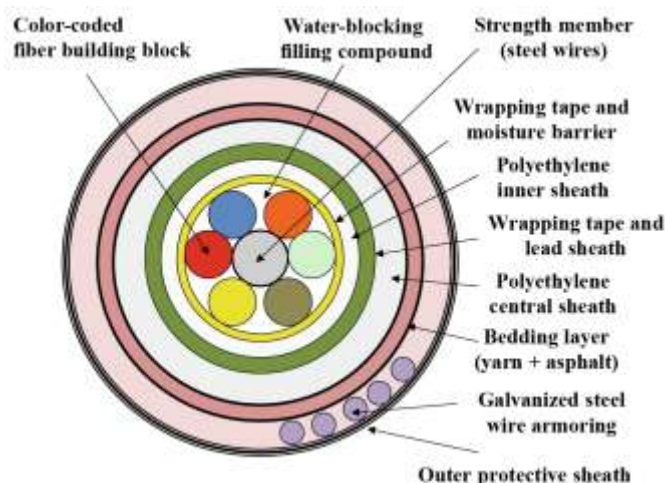


Рисунок 2.32 – Приклад конфігурації підводного волоконно-оптичного кабелю

Завдяки цим конструкційним особливостям підводні оптоволоконні кабелі здатні витримувати екстремальні умови та забезпечувати високошвидкісний зв'язок між континентами, що є критично важливим для глобальної телекомунікаційної інфраструктури.

2.10 Висновки

Оптичні волокна є ключовим елементом сучасних систем передачі даних. Їхня структура і механізми поширення світла є критично важливими для розуміння принципів роботи цих технологій. У своїй базовій формі оптичне волокно складається з двох основних компонентів. Центральне осердя, яке проводить світло, виготовляється з матеріалу (зазвичай скла або пластику) з певним показником заломлення n_1 . Оболонка оточує осердя і має менший показник заломлення n_2 , де $n_2 < n_1$. Оболонка виконує роль захисту осердя та забезпечує умови для відбиття світла.

У процесі поширення світла в оптичному волокні діють два основні механізми:

1. Коли світло переходить з матеріалу з високим показником заломлення (осердя) в матеріал з нижчим показником (оболонка), відбувається повне внутрішнє відбиття, якщо кут падіння світла перевищує критичний кут. Це явище дозволяє світлу залишатися в межах осердя і поширюватися вздовж волокна, не виходячи за межі оболонки;

2. Світло, яке потрапляє в осердя, може затримуватися в ньому завдяки багаторазовому відбиттю від межі між осердям і оболонкою. Це затримка відбувається внаслідок того, що світло, яке відбивається, залишається в осерді, поки не досягне певної точки, де воно може бути знову відбито або вийти з волокна.

У волокнах зі ступінчастим показником заломлення на межі між осердям і оболонкою забезпечується ефективна умова для відбиття світла, що, зі свого боку, дозволяє досягати високої швидкості передачі даних. Завдяки своїй структурі та механізмам поширення світла оптичні волокна забезпечують високу пропускну спроможність і низькі втрати сигналу, що робить їх ідеальним вибором для телекомунікаційних мереж, медичної апаратури, а також багатьох інших сфер.

Волокна з градуйованим показником заломлення (ГПЗ) і фотонно-кристалічні волокна (ФКВ) є двома типами оптичних волокон, які пропонують унікальні характеристики, що відрізняють їх від традиційних волокон зі ступінчастим показником заломлення. У волокнах з градуйованим показником заломлення показник заломлення $n(r)$ змінюється залежно від радіальної координати r в осерді, в той час як в оболонці він залишається постійним. Це забезпечує плавний перехід між показниками заломлення, що зменшує затримки в сигналі.

Найчастіше використовуваний профіль показника заломлення поданий у вигляді степеневі функції.

Волокна з градуйованим показником заломлення зменшують дисперсію сигналу, що дозволяє досягати ширшої смуги пропускання порівняно з волокнами зі ступінчастим показником заломлення. Це робить

їх особливо придатними для застосунків, що вимагають високої швидкості передачі даних.

Фотонно-кристалічні волокна відрізняються тим, що їх оболонка (і іноді осердя) містять регулярні повітряні отвори, які проходять по всій довжині волокна. Ця мікроструктура дозволяє створити особливі оптичні властивості. Структурне розташування отворів у ФКВ дозволяє контролювати світлопропускання:

- змінюючи розміри та розташування отворів, можна управляти дисперсією світла, що дозволяє оптимізувати сигнал для певних застосунків;

- ФКВ можуть використовуватися для посилення нелінійних ефектів, що є корисним для створення нових частот або для генерації імпульсів;

- завдяки своїй структурі, фотонно-кристалічні волокна можуть демонструвати унікальні ефекти двопрорене заломлення, що відкриває нові можливості для маніпуляцій зі світлом.

Обидва типи волокон – радуїовані та фотонно-кристалічні – пропонують значні переваги порівняно зі звичайними волокнами зі ступінчастим показником заломлення. Вони забезпечують кращу продуктивність в умовах високих швидкостей передачі даних і пропонують нові можливості для управління оптичними властивостями, що робить їх важливими для сучасних телекомунікаційних технологій і оптичних систем. Поширення світла в оптичних волокнах можна розглядати з різних перспектив, і модель трасування променів (геометрична оптика) є корисним інструментом для інтуїтивного розуміння цього процесу. Однак для більш точного опису взаємодії світла з волокном, особливо в контексті дисперсії сигналу та втрат потужності, потрібно звернутися до хвильової теорії.

У моделі пластинчастого хвильоводу центральна ділянка з показником заломлення n_1 оточена двома шарами матеріалу з нижчим показником заломлення n_2 . Світло, що потрапляє в хвильовід, зазнає повного внутрішнього відбиття на межах між цими матеріалами, що дозволяє йому поширюватися вздовж хвильоводу. Променева модель дозволяє візуалізувати, як світлові промені можуть відбиватися і проходити через хвильовід, що дає змогу зрозуміти основні принципи роботи оптичних волокон. Променева модель є особливо корисною, для розуміння кутів падіння, критичних кутів і умов для повного внутрішнього відбиття.

Хвильова теорія пропонує більш детальний опис поширення світла в оптичному волокні, виходячи з принципів електромагнітних хвиль. У цьому контексті електромагнітні поля, які поширюються в волокні, можна описати як суперпозицію елементарних конфігурацій поля, відомих як моди волокна. Моди – це специфічні розподіли електромагнітних полів, які відповідають певним частотам і умовам для поширення в хвильоводі. Кожна мода має свої власні характеристики, такі як:

- частота, як швидко мода може поширюватися;

- розподіл енергії визначає, як енергія світла розподіляється в осерді та оболонці волокна.

Використання хвильової теорії дозволяє точніше моделювати дисперсію сигналу, яка виникає внаслідок різних швидкостей поширення різних частот у волокні. Це важливо для забезпечення високої якості передачі даних, оскільки дисперсія може призводити до спотворення сигналу. Хвильова теорія також дозволяє аналізувати втрати потужності, які можуть виникати внаслідок розсіювання, поглинання та інших механізмів. Це знання є критично важливим для оптимізації дизайну оптичних волокон та підвищення їх ефективності.

Отже, хоча променева модель є корисною для базового розуміння поширення світла в оптичних волокнах, хвильова теорія забезпечує більш повну картину, особливо в контексті дисперсії сигналу та втрат потужності. Це дозволяє інженерам і науковцям розробляти більш ефективні оптичні системи, які можуть задовольняти зростаючі вимоги до швидкості і якості передачі даних. Модою монохроматичного світла з радіанною частотою ω , що поширюється в осьовому (додатному z) напрямку у волокні, може бути описана коефіцієнтом $\exp[j(\omega t - \beta z)]$, де β – стала поширення моди. Для керованих (зв'язаних) мод β може приймати лише скінченну кількість можливих значень. Ці розв'язки знаходять шляхом розв'язання рівнянь Максвелла для діелектричного середовища з урахуванням граничних умов електромагнітного поля на межі розділу осердя – оболонка оптичного волокна.

Аналіз мод у оптичних волокнах дійсно може бути досить складним, особливо через граничні умови, які взаємодіють між поздовжніми компонентами електричних E і магнітних H полів. Ці умови можуть призводити до виникнення гібридних мод, які ускладнюють розв'язання. Однак існують спрощені моделі, які дозволяють ефективно оцінити характеристики оптичних волокон, зокрема, в контексті волокон зі ступінчастим показником заломлення.

У звичайних волокнах зі ступінчастим показником заломлення, різниця між показниками заломлення осердя n_1 та оболонки n_2 є досить малою, що дозволяє використовувати певні припущення для спрощення аналізу.

Припускається, що мода, в основному, поширюється в осерді, а оболонка відіграє роль «захисного шару» для забезпечення умов повного внутрішнього відбиття. Враховується, що електричні та магнітні поля моди розподілені переважно в осерді, а їх амплітуди в оболонці можуть бути незначними. Це спрощене наближення дозволяє ефективно оцінювати такі характеристики, як:

- критичний кут визначає, за якого кута падіння світло починає піддаватися повному внутрішньому відбиттю;
- оцінювання кількості мод, які можуть поширюватися в даному волокні, є важливим для визначення його пропускної спроможності;

- аналіз залежності швидкості поширення мод від частоти, що важливо для розуміння можливих втрат якості сигналу.

Цей спрощений, але точний підхід активно використовується в інженерії оптичних волокон, що:

- допомагає в розробці волокон з оптимізованими характеристиками для специфічних застосунків (наприклад, в телекомунікаціях);

- дозволяє швидко оцінити, які фактори можуть призводити до втрат потужності і як їх можна мінімізувати;

- використовується в комп'ютерних моделях для симуляції поведінки світла в оптичних волокнах, що дозволяє розуміти їхні властивості без потреби у складних обчисленнях.

Хоча аналіз мод у оптичних волокнах може бути складним через гібридні зв'язки, використання спрощеного підходу, ґрунтуючись на малих різницях показників заломлення, забезпечує ефективний і точний спосіб оцінювання хвилеводних характеристик. Це дозволяє інженерам і дослідникам розробляти та оптимізувати оптичні волокна для різноманітних застосунків у сучасних технологіях зв'язку.

2.11 Контрольні завдання

Завдання 2.1 Нехай деяка хвиля задана формулою $y=8 \cos 2\pi(2t - 0.8z)$, де y виражено у мікрометрах, а сталу поширення задано у мкм^{-1} . Знайти (а) амплітуду, (б) довжину хвилі, (с) кутову частоту і (д) при $t = 0$ і $z = 4$ мкм . Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 2.2 Нехай у рівнянні (2.7) $E_{0x} = E_{0y} = 1$. Напишіть програму для побудови графіків цього рівняння для значень $\delta = (n\pi)/8$, де $n = 0, 1, 2, \dots, 16$. Що свідчить про стан поляризації при зміні кута δ ? Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 2.3 Показати, що будь-яку лінійно поляризовану хвилю можна розглядати як суперпозицію лівої і правої циркулярно поляризованих хвиль, які збігаються за фазою і мають однакові амплітуди і частоти. Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 2.4 Світло, що поширюється в повітрі, падає на скляну пластинку під кутом $\theta_1 = 33^\circ$, де θ_1 вимірюється між вхідним променем і нормаллю до поверхні скла. Після чого частина променя відбивається, а частина заломлюється. (а) Якщо заломлений і відбитий промені утворюють між собою кут 90° , покажіть, що показник заломлення скла дорівнює 1,540. (б) Покажіть, що критичний кут для цього скла дорівнює $40,5^\circ$. Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 2.5 Точкове джерело світла знаходиться на глибині 12 см під поверхнею великої водойми ($n_{\text{води}} = 1,33$). Покажіть, що радіус найбільшого кола на поверхні води, через яке світло може вийти з води у повітря ($n_{\text{повітря}} = 1,000$), дорівнює 13,7 см. Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 2.6 Прямокутна призма (внутрішні кути 45° , 45° і 90°) занурена в спирт ($n = 1,45$). Покажіть, що показник заломлення призми має дорівнювати 2,05, щоб промінь, який падає на одну з коротких граней, повністю відбивався від довгої грані призми. Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 2.7 Показати, що критичний кут на межі розділу між легованим кремнеземом з $n_1 = 1,460$ і чистим кремнеземом з $n_2 = 1,450$ становить $83,3^\circ$. Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 2.8 Розглянути відбиття потужності для світла, що падає нормально на межу розділу між кінцем оптичного волокна і повітрям. Якщо показники заломлення волокна і повітря $n_{\text{fiber}} = 1,48$ і $n_{\text{air}} = 1,000$; покажіть, що коефіцієнт відбиття $R = 0,037$, а коефіцієнт пропускання $T = 0,963$. Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 2.9 Розглянемо волокно зі ступінчастим індексом з $n_1 = 1,48$ і $n_2 = 1,46$. (а) Покажемо, що числова апертура дорівнює 0,243. (б) Якщо зовнішнім середовищем є повітря з $n = 1,00$, покажіть, що кут приймання θ_A для цього волокна становить 14° . Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 2.10 Припустимо, що певне багатомодове оптичне волокно зі ступінчастим індексом має діаметр осердя 62,5 мкм, індекс осердя 1,48 і різницю індексів 0,015. (а) Покажіть, що на довжині хвилі 1310 нм значення V дорівнює 38,4. (б) Покажіть, що загальна кількість мод дорівнює 737. Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 2.11 Багатомодове волокно зі ступінчастим індексом і числовою апертурою 0,20 містить приблизно 1000 мод на довжині хвилі 850 нм. (а) Покажіть, що діаметр його осердя становить 60,5 мкм. (б) Покажіть, що волокно підтримує 414 мод на 1320 нм. (с) Покажіть, що волокно підтримує 300 мод на довжині хвилі 1550 нм. Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 2.12 Певне волокно зі ступінчастим індексом має радіус осердя 25 мкм, $n_1 = 1,48$ і $n_2 = 1,46$. (а) Покажіть, що нормована частота на 820 нм дорівнює $V = 46,5$. (б) Покажіть, що в цьому волокні на довжині

хвилі 820 нм поширюється 1081 мода. (с) Покажіть, що 417 мод поширюються в цьому волокні на довжині хвилі 1320 нм. (d) Показати, що 303 моди поширюються в цьому волокні на довжині хвилі 1550 нм. (е) Переконайтеся, що відсоток потоків оптичної потужності в оболонці для різних довжин хвиль становить 4,1% при 820 нм, 6,6% при 1320 нм і 7,8% при 1550 нм. Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 2.13 Розглянемо волокно з радіусом осердя 25 мкм, індексом осердя $n_1 = 1.48$ і $\Delta = 0.01$. (a) Показати, що на довжині хвилі 1320 нм параметр $V = 25$ і кількість мод $M=312$. (b) Переконайтеся, що 7.5% оптичної потужності протікає в обшивці. (с) Якщо різницю між осердям і оболонкою зменшити до $\Delta = 0,003$, показати, що кількість режимів $M = 94$ і 13,7% оптичної потужності протікає в оболонці. Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 2.14 Припустимо, що певне волокно зі ступінчастим індексом має радіус осердя 5 мкм, різницю індексів $\Delta = 0,002$, а індекс осердя $n_1 = 1,480$. (a) Обчисливши V -число, переконайтеся, що на довжині хвилі 1310 нм це одномодове волокно. (b) Переконайтеся, що на довжині хвилі 820 нм волокно не є одномодовим, оскільки $V = 3.514$. (с) Маючи результат з пункту (b), перевірте за допомогою спостережень на рис. 2.20, що волокно підтримує режими LP_{01} і LP_{11} на довжині хвилі 820 нм. Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 2.15 Розглянемо волокно з градуйованим індексом з діаметром осердя 62,5 мкм, яке має параболічний профіль індексу ($\alpha = 2$). Припустимо, що волокно має числову апертуру $NA = 0.275$. (a) Покажіть, що V -число для цього волокна на 850 нм дорівнює 63,5. (b) Переконайтеся, що 1008 мод поширюються у волокні на довжині хвилі 850 нм. Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 2.16 Розглянемо градієнтно-індексоване волокно з діаметром осердя 50 мкм, яке має індекс осердя $n_1 = 1.480$ та індекс оболонки $n_2=1.465$. (a) Використовуючи точний вираз для різниці індексів, наведений в рівнянні (2.39), покажіть, що $\Delta = 1,008\%$. (б) Використовуючи для наведеного в правій частині рівняння (2.39), покажемо, що $\Delta = 1.014\%$. Це показує, що апроксимація є досить точною. Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 2.17 Розрахувати кількість мод на 820 і 1300 нм у волокні з градуйованим індексом з параболічним профілем ($\alpha = 2$), радіусом осердя 25 мкм, $n_1 = 1.48$ та $n_2 = 1.46$. Як це порівняно з волокном зі ступінчастим

індексом? Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

Завдання 2.18 Розрахувати числові апертури (а) пластикового ступінчастого волокна з показником заломлення осердя $n_1 = 1.60$ і показник заломлення оболонки $n_2 = 1.49$, (б) ступінчасте волокно з кремнеземним осердям ($n_1 = 1.458$) і оболонкою з силіконової смоли ($n_2=1.405$). Навести приклад лістингу програми мовою Python для автоматизованого розрахунку задачі.

ВИСНОВКИ

Технологія оптичного зв'язку пройшла довгий шлях розвитку, значно підвищуючи швидкість і ефективність передачі даних. Сьогоднішні системи можуть передавати дані зі швидкістю до 1 Тбіт/с, що значно перевищує можливості перших систем. Ключовими інноваціями, які забезпечили цей прогрес, стали:

1. Мультиплексування з поділом довжини хвилі (WDM) дозволяє передавати кілька каналів даних через одне оптичне волокно, використовуючи різні довжини хвиль. Це суттєво збільшує пропускну спроможність мереж;

2. Оптичні підсилювачі дозволяють підтримувати сильний сигнал на великих відстанях, зменшуючи втрати та забезпечуючи високу якість передачі;

3. Такі сучасні методи модулювання, як QAM, підвищують ефективність використання доступної смуги пропускання, дозволяючи передавати більше даних через те саме волокно;

4. Оптичні транспортні мережі (OTN) забезпечують ефективну передачу даних між різними системами, об'єднуючи різні формати даних та забезпечуючи надійний механізм для їх передачі;

5. Засоби моніторингу дозволяють виявляти проблеми в реальному часі та швидко на них реагувати, забезпечуючи надійність та стабільність мереж.

Ці досягнення підкріплені міжнародними стандартами, які забезпечують сумісність між обладнанням різних виробників і сприяють розвитку глобальної інфраструктури зв'язку. Отже, розвиток оптичного зв'язку є важливим чинником стрімкого розвитку цифрових комунікацій в усьому світі, задовольняючи зростаючі потреби у швидкій і з великими обсягами передачі даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A. Paradisi, R. Carvalho Figueirdo, A. Chiuchiarelli, E. de Sousa Rosa (eds.) Optical Communications (Springer, Berlin, 2019)
2. R. Hui, Introduction to Fiber-Optic Communications (Academic Press, 2019)
3. G.D. Peng, Handbook of Optical Fibers (Springer, 2019)
4. M. Ma, Current Research Progress of Optical Networks (Springer, Berlin, 2019)
5. B.E.A. Saleh, M.C. Teich, Fundamentals of Photonics, 3rd edn. (Wiley, 2019)
6. M.S. Alencar, V.C. da Rocha, Communication Systems (Springer, 2020)
7. D. Chadha, Optical WDM Networks (Wiley, 2019)
8. Y. Yue, Q. Wang, J. Anderson, Experimental investigation of 400 Gb/s data center interconnect using unamplified high-baud-rate and high-order QAM single-carrier signal. Appl. Sci. 9, 2455–2464 (2019)
9. J. Yu, Spectrally efficient single carrier 400G optical signal transmission. Front. Optoelectron. 12, 15–23 (2019)
10. J.D. Musgraves, J. Hu, L. Calvez, Springer Handbook of Glass (Springer, Berlin, 2019)
11. P. Barcik, P. Munster, Measurement of slow and fast polarization transients on a fiber-optic testbed. Opt. Exp. 28(10), 15250–15257 (2020)
12. C.C. Shen et al., Design, modeling, and fabrication of high-speed VCSEL with data rate up to 50 Gb/s. Nanoscale Res. Lett. 14, 276 (2019)
13. M. He et al., High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gb/s and beyond. Nat. Photon. 13(5), 359–364 (2019)
14. M. Forrer et al., High precision automated tab assembly with micro optics for optimized high-power diode laser collimation, in Paper 11261-10, SPIE Photonics West, Feb. 2020
15. See any general physics or introductory optics book; for example: (a) H.D. Young, R.A. Freedman, University Physics with Modern Physics, 15th edn. (Pearson, 2020); (b) K. Lizuka, Engineering Optics (Springer, 2019); (c) C.A. Diarzio, Optics for Engineers (Apple Academic Press, 2021)
16. S. Zohoori, M. Dolatshahi, M. Pourahmadi, & M. Hajisafari, An inverter-based, CMOS, low-power optical receiver front-end. Fiber Integr. Optics, 38(1), 1–20 (2019)
17. M. S. Alencar, V. C. da Rocha, Communication Systems (Springer, Berlin, 2020)
18. W. Navidi, Principles of Statistics for Engineers and Scientists, 2nd edn. (McGraw-Hill, 2021)

19. C. Lim, Y. Tian, C. Ranaweera, T.A. Nirmalathas, E. Wong, K.L. Lee, Evolution of radio-over-fiber technology. *J. Lightw. Technol.* 37(6), 1647–1656 (2019)
20. R. Keim, What is a low pass filter? A tutorial on the basics of passive RC filters. All About Circuits, 12 May 2019
21. Z. Jia, L.A. Campos, *Coherent Optics for Access Networks* (CRC Press, 2019)
22. R. Katti, S. Prince, A survey on role of photonic technologies in 5G communication systems. *Photon Netw. Commun.* 38, 185–205 (2019)
23. L. Sirleto, M.A. Ferrara, Fiber amplifiers and fiber lasers based on stimulated Raman scattering: a review. *Micromachines* 11(247), 26 (2020)
24. R. Boyd, *Nonlinear Optics*, Academic Press, 4th ed. (2020)
25. The Fiber Optic Association, The FOA Reference for Fiber Optics, www.thefoa.org/tech/ref/OSP/jargon.html. Accessed June 2020
26. K.G. Vlachos, F.M. Ferreira, S.S. Sygletos, A reconfigurable OADM architecture for high-order regular and offset QAM based OFDM super-channels. *J. Lightw. Technol.* 37(16), 4008–4016 (2019)
27. E. Stassen, C. Kim, D. Kong, H. Hu, M. Galili, L.K. Oxenløwe, K. Yvind, M. Pu, Ultra-low power all-optical wavelength conversion of high-speed data signals in high-confinement AlGaAs-on-insulator microresonators. *APL Photon.* 4, 100804 (2019)
28. D.J. Blumenthal, H. Ballani, R.O. Behunin, J.E. Bowers, P. Costa, D. Lenoski, P. Morton, S.B. Papp, P. T. Rakich, Frequency-stabilized links for coherent WDM fiber interconnects in the datacenter. *J. Lightw. Technol.* 38 (Apr. 2020)
29. G. Kanakis et al., High-speed VCSEL-based transceiver for 200 GbE short-reach intra-datacenter optical interconnects. *Appl. Sci.* 9 (2019)
30. C. Xie, L. Wang, L. Dou, M. Xia, S. Chen, H. Zhang, Z. Sun, J. Cheng, Open and disaggregated optical transport networks for data center interconnects. *J. Opt. Commun. Netw.* 12, C12–C22 (2020)
31. IEEE 802.3ca 25G/50G-EPON standard (June 2020)
32. L.B. Du, X. Zhao, S. Yin, T. Zhang, A.E.T. Barratt, J. Jiang, D. Wang, J. Geng, C. DeSanti, C.F. Lam, Long-reach wavelength-routed TWDM PON: Technology and deployment. *J. Lightw. Technol.* 37(3), 688–697 (1 Feb. 2019)

Електронне навчальне видання

**Микола Володимирович Васильківський
Геннадій Григорович Бортник
Дмитро Валерійович Михалевський**

Волоконно-оптичні телекомунікаційні технології

Навчальний посібник

Рукопис оформив *М. Васильківський*

Редактор *В. Дружиніна*

Оригінал-макет виготовила *Т. Старічек*

Підписано до видання 08.05.2025 р.
Гарнітура Times New Roman.
Зам. № P2025-070.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 65-18-06.
press.vntu.edu.ua;
Email: irvc.vntu@gmail.com
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.