

ТЕОРІЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ

Девид Бейли, Едвін Райт. Волоконная оптика: теория и практика/пер. с англ. – М.: Кудиц-Образ, 2006, – 320 с.

ВСТУП

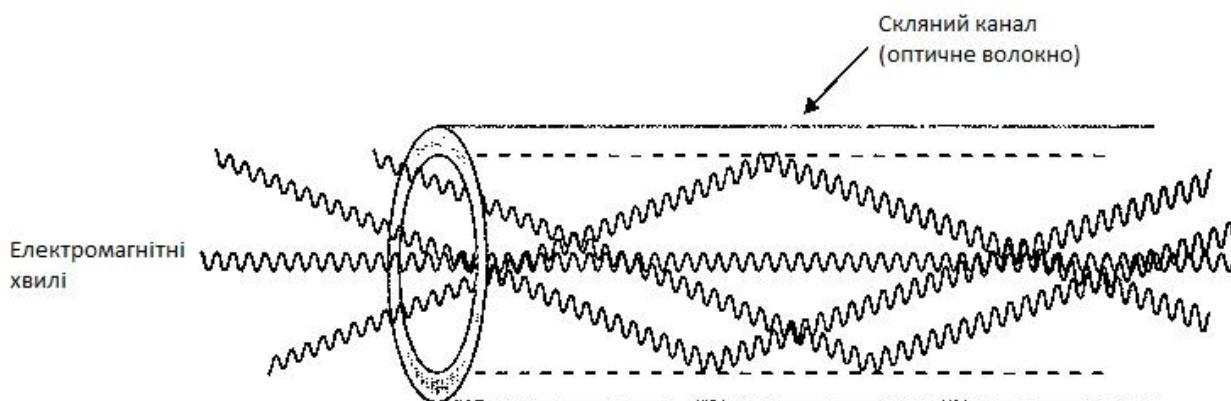
У цьому розділі буде розглядатися теорія передачі інформації по оптичних волокнах. Вона детально висвітлює всі теоретичні аспекти волоконно-оптичної передачі. Глава починається з викладу фундаментальних концепцій поширення світла, потім переходить до більш складних проблем поширення світла в оптичних волокнах.

Розглянуті питання включають фундаментальні принципи і основи математичного уявлення поширення світла по скляному волокну, моди поширення світла, пристрій волокна, можливості і обмеження волоконно-оптичної передачі, процеси виготовлення волокна і перспективи розвитку.

3.1. ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ДІЇ

3.1.1. Вступ

Фундаментальним принципом, що лежить в основі зв'язку за допомогою оптичних волокон, є проходження електромагнітної енергії по скляній трубці, як по тунелю від передавача до приймача. Скляна трубка діє подібно трубопроводу, що передає всю електромагнітну енергію з однієї точки в іншу. Електромагнітна енергія, що використовується в цій системі передачі, розташовується в зоні електромагнітного спектра, близькою до діапазону видимого світла. Тому скло є ідеальною середовищем для передачі цієї електромагнітної енергії, бо світло проходить крізь скло з низьким рівнем ослаблення.



Мал.3.1 Ілюстрація електромагнітної енергії, що проходить через скляний канал.

3.1.2. Відбивання, заломлення і дифракція

Далі наводиться короткий огляд деяких фундаментальних фізичних принципів. Відображення, заломлення і дифракція є трьома головними явищами, що викликають зміни поширення електромагнітної хвилі (включаючи світлове, радіо-, рентгенівське, гамма-випромінювання та ін.). Ми зосередимося на особливостях світлового випромінювання.

Відбивання

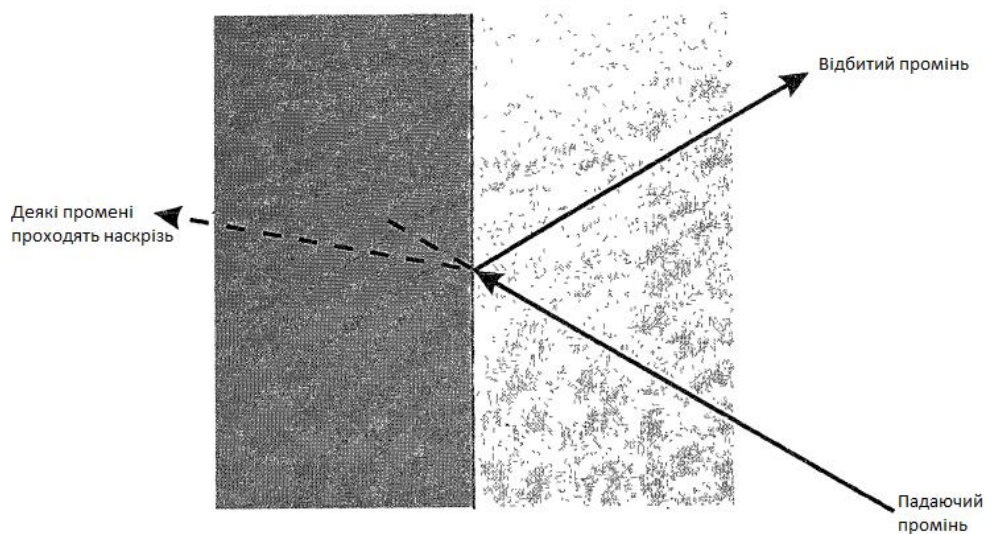
В цьому випадку промінь світла, що проходить крізь середовище з певною щільністю, стикається із середовищем з щільністю, відмінною від щільності середовища, в якій він поширювався, і частково або повністю відбивається від межі двох середовищ.

Заломлення

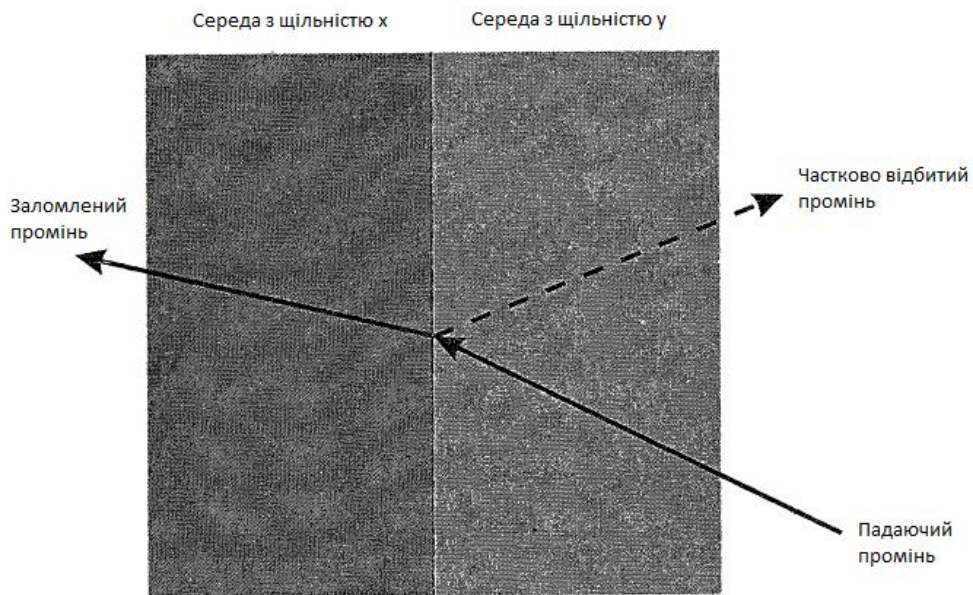
В цьому випадку промінь світла повністю або частково проникає в середу з щільністю, відмінною від щільності середовища, в якій він до цього рухався, і незначно змінює свій напрямок у порівнянні з напрямком поширення в попередньої середовищі. Невелика частина енергії також відбивається, як показано на мал. 3.3.

Дифракція

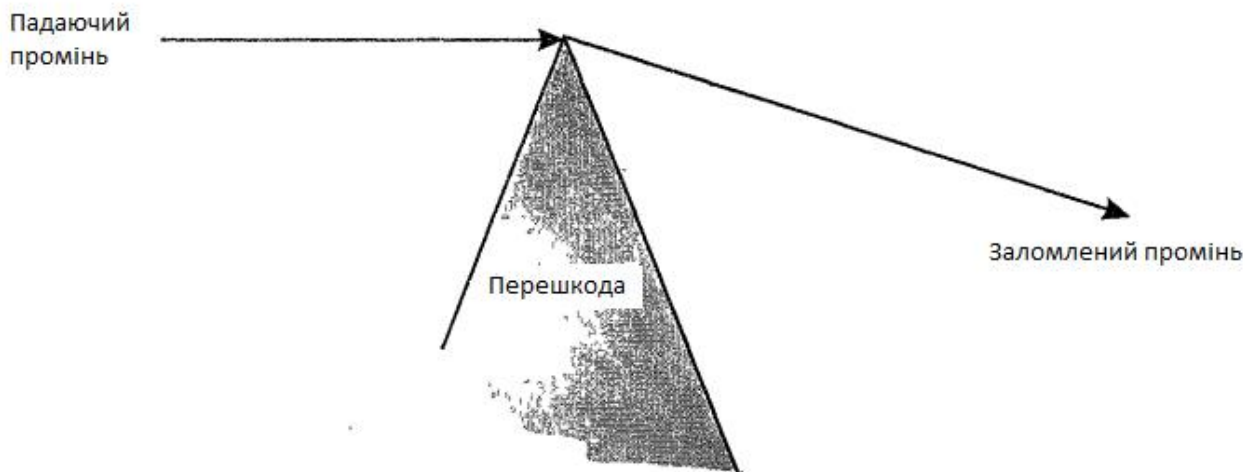
В цьому випадку промінь світла долає перешкоду і незначно змінює напрямок поширення в напрямку перешкоди. Подібне явище спостерігається, коли водні брижі стикаються зі стиртящим виступом скелі або землі і, огинаючи його, незначно змінює напрямок поширення в його сторону.



Мал.3.2 Ілюстрація відображення



Мал.3.3 Ілюстрація заломлення



Мал.3.4 Ілюстрація дифракції

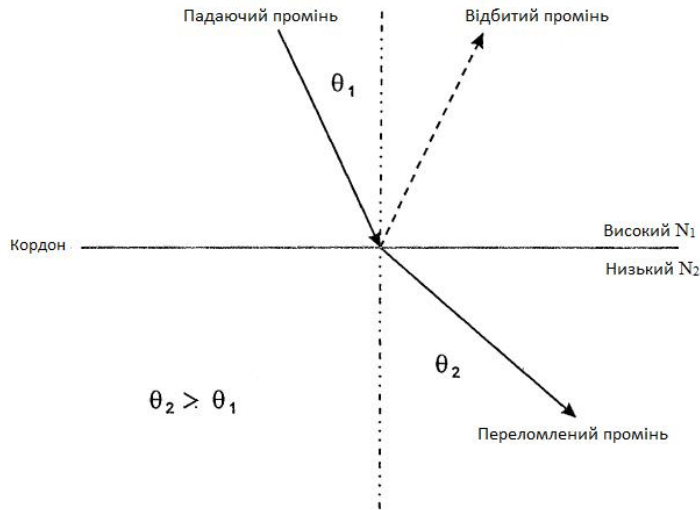
3.1.3. Показник заломлення

Світло за своєю природою поширюється в різних середовищах з різними швидкостями. Чим щільніше середовище, тим нижче швидкість поширення в ній світла. Була встановлена відповідна міра, що має відношення як до щільності матеріалу, так і до швидкості поширення світла в цьому матеріалі. Цей захід назвали показником заломлення. для будь-якого матеріалу показник заломлення вимірюється щодо швидкості поширення світла у вакуумі (вакуум часто називають вільним простором). Наступна формула описує це відношення.

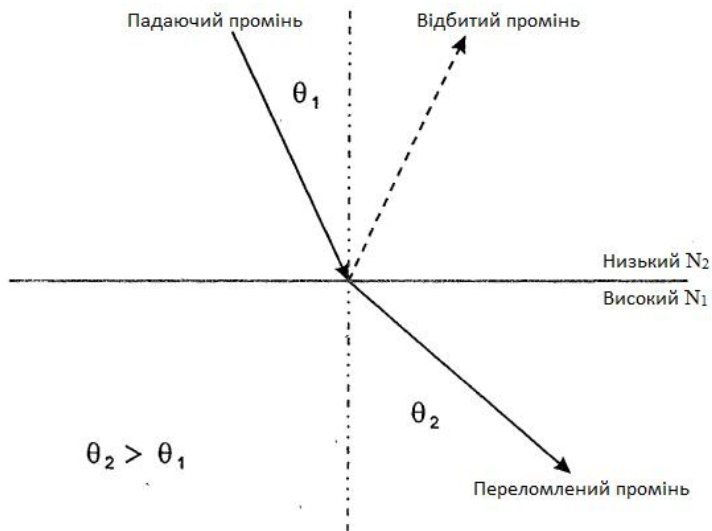
$$\text{Показник заломлення середовища} < \frac{\text{Швидкість світла в вакуумі}}{\text{Швидкість світла в середовищі}}$$

$$< \frac{2 \times 07}{\text{Дійсна швидкість}^+ \text{м} \cdot \text{с}} +$$

Чим вище показник заломлення матеріалу, тим він щільніше. Коли промінь світла проникає з одного матеріалу в інший (з іншим показником заломлення), кут заломлення буде відрізнятися від кута падіння. Промінь світла, що проникає в середу з меншим показником заломлення, буде виходити з кутом, більшим кута падіння. Промінь світла, що проникає в середу з великим показником заломлення, буде виходити з кутом, меншим кута падіння. Його показано на мал. 3.5.



Мал.3.5, а. Промінь, який проходить з середовища з високим N_1 в середу з низьким N_2



Мал.3.5, б. Промінь, який проходить з середовища з низьким N_2 в середу з високим N_1

В даному випадку θ_1 є кутом падіння, а θ_2 - кутом заломлення. Нижче перераховані деякі типові показники заломлення.

Вакуум	1,0000
--------	--------

Повітря	1,0002
Вода	1,333
Розплавлений кварц	1,452
Оптичне скло (кромглас)	1,517
Щільний флінтглас	1,655
Алмаз	2,421
Етиловий спирт	1,360
Силоксан	1,405

Цікаво відзначити, що для рентгенівських променів показник заломлення скла завжди менше, ніж для повітря, тому вони при проходженні з повітря в скло відхиляються в сторону від перпендикуляра, а не до перпендикуляру, як світлові промені.

3.1.4. Закон Снелла

Голландський астроном і математик Уїлброд ван Ройен Снелл (Willebrod van Roijen Snell) в 1621 р. вивів рівняння для опису проходження світла через різні матеріали. Відношення виглядає наступним чином:

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

де n_1 та n_2 - коефіцієнти заломлення матеріалів 1 і 2 відповідно; θ_1 і θ_2 - кути падіння і заломлення в відповідних матеріалах.

Отже, з наведеної вище формули виводиться наступна:

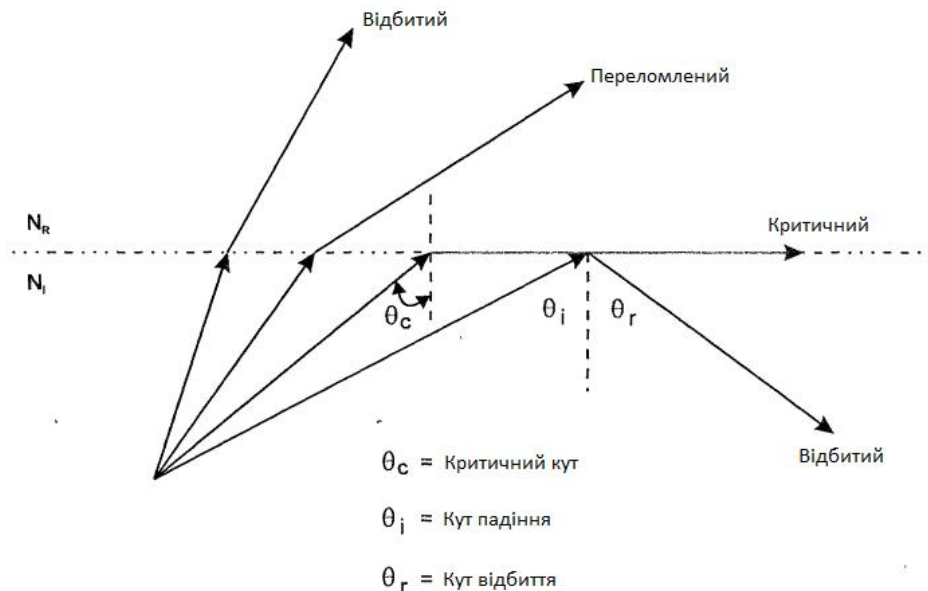
$$\frac{\sin(\theta_1)}{v_1} = \frac{\sin(\theta_2)}{v_2}$$

де v_1 та v_2 - швидкості світла в середовищах 1 і 2 відповідно.

3.1.5. Внутрішнє відбивання

Коли світло проходить з одного матеріалу в інший з відмінною щільністю, частина падаючого світла відбивається. Цей ефект більш помітний, коли світло проходить з середовища з високою щільністю в середу з меншою щільністю. Точна кількість відбиваного світла залежить від ступеня зміни показника заломлення і від кута падіння.

Із зростанням кута падіння кут заломлення зростає в більшій мірі. При певному куті падіння (θ_c) кут заломлення променя досягає 90° (тобто заломлення промінь рухається паралельно кордоні середовищ). Цей кут називається «критичним кутом». Промені, у яких кут падіння перевищує критичний, зазнають повне внутрішнє віддзеркалення. Теоретично при повному внутрішньому відбитті відбивається 100% світлової енергії, але на практиці відбивається близько 99,9% падаючих променів. Це показано на мал. 3.6.



Мал.3.6 Критичний кут

Критичний кут (θ_c) визначається за формулою

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_r}{n_i} \right)$$

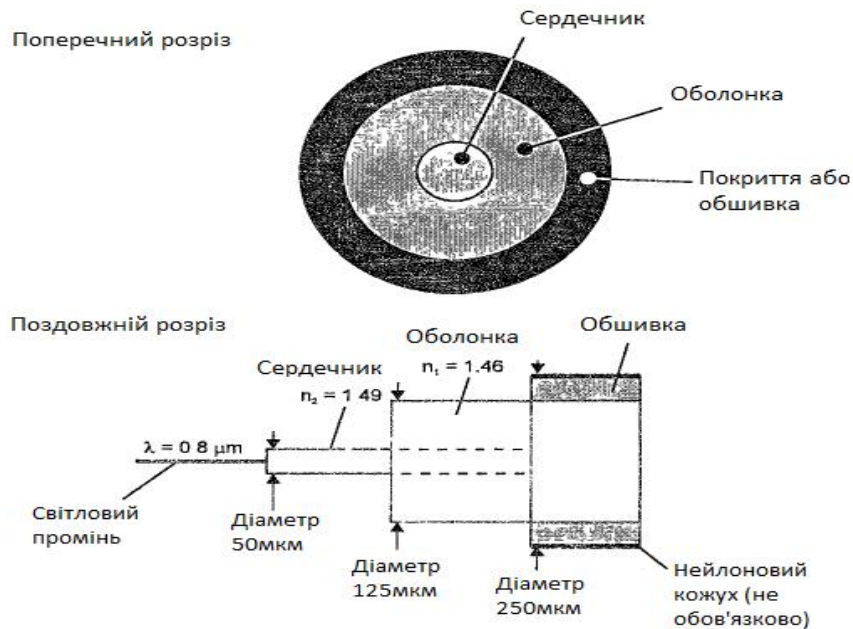
При повному внутрішньому відбитті кут падіння дорівнює куту відбиття.

3.1.6. Зовнішнє відбивання

При проходженні світла через середовище і зіткненні його з кордоном більш щільною середовища з кутом більше критичного має місце той же ефект, що і при внутрішньому відображенні, але в меншому ступені. Це явище називають зовнішнім відображенням. Повне зовнішнє відображення має місце лише при куті падіння 90° .

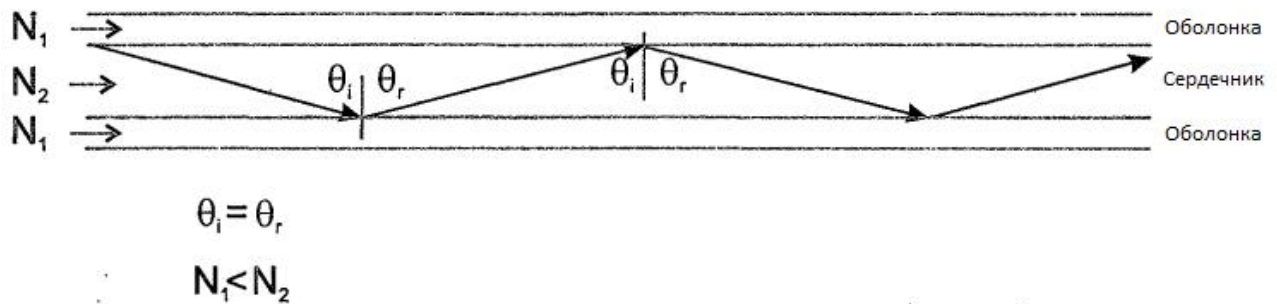
3.1.7. Будова оптичного волокна

Оптичне волокно складається зі скляної трубки, складеної з кількох шарів скла, які при розгляданні в поперечному зрізі виглядають як концентричні кола. Кожен шар (або кільце) скла має свій показник заломлення. З попереднього обговорення можна бачити, що для того, щоб послати світло уздовж центру цих концентричних скляних труб, необхідно, щоб говорили про повне внутрішнє віддзеркалення. Воно проведе світло через волокно. Для досягнення повного внутрішнього відображення зовнішні шари скла повинні мати менші показники заломлення, ніж у внутрішнього скляного стрижня, по якому проходить світло. На мал. 3.7 показано будову типового оптичного волокна. Діаметри оболонки і покриття, показані на малюнку, прийняті в якості стандартних для більшості використовуються в світі волокон, а діаметр сердечника і показники заломлення розрізняються залежно від виду волокна (це обговорюється в наступних розділах).



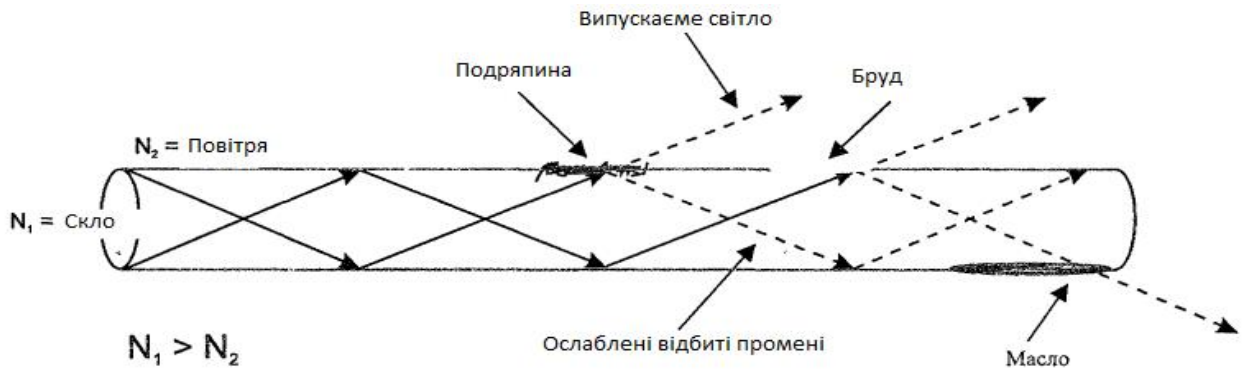
Мал.3.7 Будова оптичного волокна

Сердечник і оболонка захоплюють світловий промінь в сердечник за умови, що промінь світла входить в сердечник під кутом більше критичного. Тоді промінь світла поширюється уздовж сердечника волокна з мінімальною втратою потужності за рахунок повного внутрішнього відображення. Цей процес показаний на мал. 3.8.



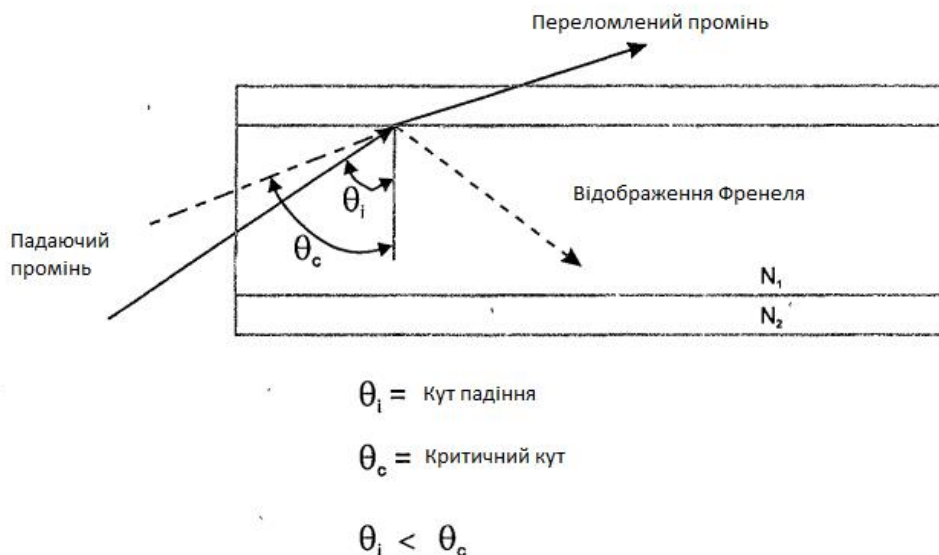
Мал.3.8 Промінь світла, що розповсюджується вздовж оптичного волокна

Теоретично було б можливо використовувати в якості сердечника скляний однорідний стержень з постійним показником заломлення, а в якості оболонки - повітря. Це можливо, оскільки у повітря показник заломлення менше, ніж у скла. Зазвичай така реалізація не працює належним чином, оскільки незахищений сердечник, покритий подряпинами, брудом і маслом, виявляється оточеним нерівномірною обшивкою з великим показником заломлення в місцях забруднень і пошкоджень. Тому значна частина світла буде відбиватися, а випромінюватися зі скла. Це показано на рис. 3.8, а.



Мал.3.8, а. Проблеми на межі скло - повітря

На практиці передача світла вздовж волокна складніша, ніж описано вище, оскільки світло насправді поширюється через скло по тривимірній східчастій спіралі. Для точного аналізу такого поширення потрібно надзвичайно складний математичний апарат, який не має практичної цінності і опис якого виходить



Мал.3.8, б. Відображення Френеля

за рамки даної книги. У цій книзі аналіз поширення світла через оптичне волокно буде розглядатися з двовимірної точки зору.

Сердечник зазвичай роблять з кварцового скла з германієвими присадками. Оболонка, як правило, виготовляється з майже чистого кварцового скла. Тому у оболонки показник заломлення менше, ніж у сердечника (чим більше присадок в склі, тим більше його щільність). Кожух найчастіше виготовляють з зміцненого ультрафіолетовим опроміненням пластика, що забезпечує захист від зношування і зовнішніх впливів. Кожух зазвичай фарбують в різні кольори, як і для багатожильних мідних кабелів, щоб дати можливість користувачу розрізнити волокна.

3.1.8. Відбивання Френеля

Коли світло входить в сердечник волокна і потрапляє на оболонку під кутом менше критичного, велика частина енергії світла заломлюється в оболонку і втрачається (що небажано). (Тут явна помилка у автора. Можна, звичайно, дати це в виноску, але не варто дискредитувати автора, а з ним і книгу.) Дуже незначна частина світла буде відображена назад в сердечник. Це відбите світло називають світлом «відображення Френеля». Він найчастіше становить менше 4% від загальної

енергії падаючого світла (обчисленого за формулою з розділу 5.1.5), тому його потужності зазвичай недостатньо для доставки стороннього сигналу на інший кінець волокна. Це показано на рис. 3.8, б.