

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра _____ Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)

_____ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДОВОГО СКЛАДУ ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН _____

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи _____ ФТОІм-19-1

_____ Дегтярьов Р. М.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 152 «Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка»

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми _____ освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо -наукова)

Освітня програма _____ «Фотоніка та

_____ оптоінформатика»

(повна назва освітньої програми)

Керівник _____ проф. каф. ФОЕТ Вертій О. О

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____

(підпис)

_____ Мачехін Ю. П.

(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Дегтярьову Руслану Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження модового складу оптичних волокон

затверджена наказом університету від " 27 " жовтня 2020 р. № 1450 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 14 грудня 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи конструкція та складові частини оптоволоконної лінії передачі; матеріальні параметри складових частин оптичного волокна; довжина хвилі випромінювання $\lambda = 1.55$ мкм; модовий склад циліндричних оптичних хвилеводів

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1 Причини дії, особливості та сфери застосування оптоволоконних ліній передачі. 2 Різновид оптичних волокон, недоліки та переваги. 3 Основи хвильового підходу для аналізу розповсюдження світла в оптичному волокні. 4 Основні принципи створення моделей оптичних хвилеводів в пакеті Comsol. 5 Розрахунок просторового розподілу поля основних мод оптичного волокна.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Схема оптична структура (Л1) — установка експериментальна 1 шт.

Кресленик деталі монтажна панель — А4 –1 шт.

Кресленик деталі перехідник з різьбою — А4 –1 шт.

Демонстраційний матеріал —18 шт.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел щодо фізичних властивостей оптоволоконних хвилеводів	02.11.20 — 09.11.20	Виконано
2	Ознайомлення з основними принципами роботи в пакеті Comsol	10.11.20 — 16.11.20	Виконано
3	Створення комп'ютерної моделі оптичного волокна та проведення чисельних розрахунків	17.11.20 — 23.11.20	Виконано
4	Аналіз отриманих результатів	24.11.20 — 27.11.20	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	28.11.20 — 02.12.20	Виконано
6	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів	03.12.20 — 06.12.20	Виконано
7	Проходження нормо контролю і отримання рецензії	07.12.20 — 12.12.20	Виконано
8	Підготовка та захист атестаційної роботи	13.12.20 — 16.12.20	

Дата видачі завдання 02 листопада 2020 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. каф. ФОЕТ Вертій О. О.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи: 48 с., 27 рис., 2 додатки, 13 джерел.

ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО, ДИСПЕРСІЯ, ОДНОМОДОВЕ ВОЛОКНО, БАГАТОМОДОВЕ ВОЛОКНО, КАБЕЛЬ, СЕРЦЕВИНА, ПРОМІНЬ

Об'єкт дослідження — одномодове оптичне волокно.

Мета роботи — закріплення знань про основні закономірності фізичних процесів що відбуваються в оптичному волокні при розповсюдженні світлових хвиль.

Методи досліджень — комп'ютерне моделювання з використанням пакету COMSOL.

ABSTRACT

Explanatory note of attestation work: 48 p., 27 fig., 2 appendices, 13 sources.

OPTICAL FIBER, DISPERSION, SINGLE MODE FIBERS, MULTIMODE FIBERS, CABLE, CORE, BEAM

The object of research is a single — mode optical fiber.

The purpose of the work — to consolidate knowledge about the basic laws of physical processes occurring in the optical fiber during the propagation of light waves.

Research methods — computer simulation using the COMSOL package.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка аттестационной работы: 48 стр., 27 рис., 2 приложения, 13 источников.

ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО, ДИСПЕРСИЯ, ОДНОМОДОВОЕ ВОЛОКНО, МНОГОМОДОВОЕ ВОЛОКНО, КАБЕЛЬ, СЕРДЕЧНИК, ЛУЧ

Объект исследования — одномодовое оптическое волокно.

Цель работы — закрепление знаний об основных закономерностях физических процессов происходящих в оптическом волокне при распространении световых волн.

Методы исследований — компьютерное моделирование с использованием пакета COMSOL.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1. Оптичне волокно.....	9
1.1 Структура оптичного волокна	10
1.2 Основні характеристики оптичного волокна.....	13
1.3 Профіль показника заломлення.....	15
1.4 Дисперсійні властивості.....	17
1.5 Одномодові та багатоходові волокна.....	19
1.5.1 Конструктивні відмінності.....	19
1.5.2 Відмінності в дальності сигналу.....	20
1.5.3 Різниця у вартості.....	21
1.5.4 Основні положення хвильової теорії передачі світла по оптичних волокнах.....	23
2. Дослідження власних режимів волоконних світловодів.....	25
2.1 Типи і характеристики мод волоконного світловоду.....	25
2.2 Програма COMSOL.....	29
2.3 Аналіз результатів чисельних розрахунків.....	31
Висновки.....	46
Перечень джерел посилання.....	48
Додаток А Графічний матеріал.....	50
Додаток Б Демонстраційний матеріал.....	55

ВСТУП

Оптичне волокно (оптоволокну, ОВ) — це тонкі нитки з кварцового скла, в яких інформація передається за допомогою світла. Товщина кожної нитки становить всього 125 мкм, це трохи більше за людську волосину. У кабелі знаходиться до 96 таких ниток. Щоб забезпечити збереження, їх покривають поліетиленовою і пластиковою оболонкою, сталевий дротом або металеву броню.

Оптоволоконні технології використовують не тільки в інтернет-комунікаціях. Одне з ключових призначень оптики-акустичні спостереження. Наприклад, кабелі прокладають вздовж нафто- і газопроводів. У медицині «оптику» використовують як джерело світла. Тонкість і гнучкість кабелю допомагає бачити, що відбувається всередині людського організму і коригувати лікування.

У 1934 р американець Норман Р. Френч отримав патент на оптичну телефонну систему, мовні сигнали в якій передавалися за допомогою світла по стрижнях чистого скла. У 1962 році був створений напівпровідниковий лазер і фотодіод, використовувані як джерело і приймач оптичного сигналу. Оптичне волокно, як правило, має круглий перетин і складається з двох частин — серцевини і оболонки. Для забезпечення повного внутрішнього відображення абсолютний показник заломлення серцевини трохи вище показника заломлення оболонки. Серцевина виготовляється з чистого матеріалу (скла або пластика) і має діаметр 9 мкм (для одномодового волокна), 50 або 62,5 мкм (для багатомодового волокна). Оболонка має діаметр 125 мкм і складається з матеріалу з легуючими добавками, що змінюють показник заломлення.

1 ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО

Оптоволоконний кабель — являє собою двошарову трубку зі скла або синтетичного матеріалу, укладену в оболонку. Двошарова оптична жила розміщується в пластиковій трубці, заповненій гідрофобним гелеподібною речовиною. Одночасно в трубці можуть перебувати від чотирьох до 12-ти оптичних волокон. Загальна кількість пучків в кабелі може досягати 144-х (8, 12 ... 32, 48, 64 і т.д.). Залежно від умов прокладки конструкція передбачає шар поліетиленової плівки для захисту від вологи, силових кевларових ниток або броні, виконаної з заліза, сталі або склопластику, шар поліетилену з гідрофобним гелем. Всі моделі оптоволокна зовні захищені товстою оболонкою з м'якого поліетилену, що захищає конструкцію від зовнішніх впливів.

Як працює оптоволокно? Внутрішній і зовнішній шари мають різні значення заломлення, внаслідок чого світловий промінь рухається в середовищі провідника, повністю відбиваючись від матеріалу оболонки. Таким чином, втрата потужності променя зводиться до мінімуму, що, в свою чергу, сприяє його руху на далекі і наддалекі відстані.

Існує кілька способів передачі сигналу по оптичному провіднику, що розрізняються за кількістю переданих мод. Мода — це світловий промінь, що рухається в середовищі однієї оптичної нитки з параметрами, які розраховуються за формулою Максвелла. У одномодовому (англ. SingleMode, SM) кабелі в середовищі одного провідника можливий рух одного променя (діаметр провідника становить 6 мкм або 9 мкм). У багатомодових (англ. MultiMode, MM) кабелях можливе поширення декількох променів з різними модами (діаметр 50 мкм або 62,5 мкм). Зовнішній діаметр всіх типів оптичного волокна разом з оболонкою становить 125 мкм, при цьому, для збереження стандартного розміру невикористані оптичні нитки закривають заглушками.

Технічні параметри кабелю, такі як кількість мод, довжина хвилі, матеріал, з якого виготовлені трубки, а також кількість і склад зовнішніх шарів відображаються на ярлику виробу.

1.1 Структура 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, повне внутрішнє відбиття. 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 рис. 1.1 показано будову типового оптичного волокна [1]. Діаметри оболонки і покриття, показані на рисунку прийняті в якості стандартних для більшості використовуються в світі волокон, а діаметр серцевини і показники заломлення розрізняються залежно від виду волокна.

Серцевина і оболонка захоплюють світловий промінь в серцевину за умови, що промінь світла входить в серцевину під кутом більше критичного. Тоді промінь світла поширюється уздовж серцевини волокна з мінімальною втратою потужності за рахунок повного внутрішнього відображення. Цей процес показаний на рис. 1.2 [1].

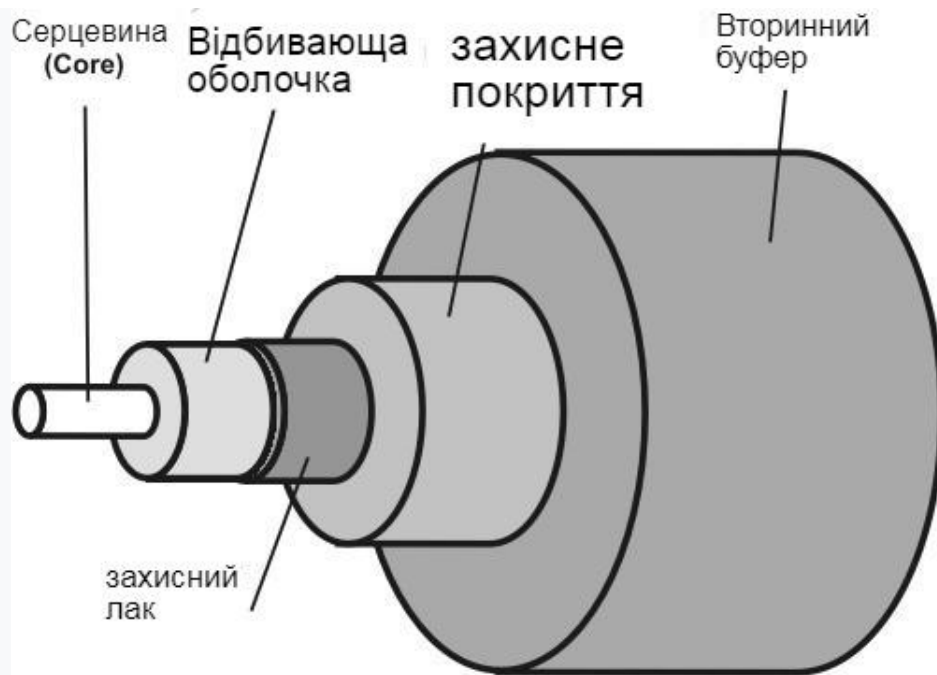


Рисунок 1.1 — Структура оптоволоконна

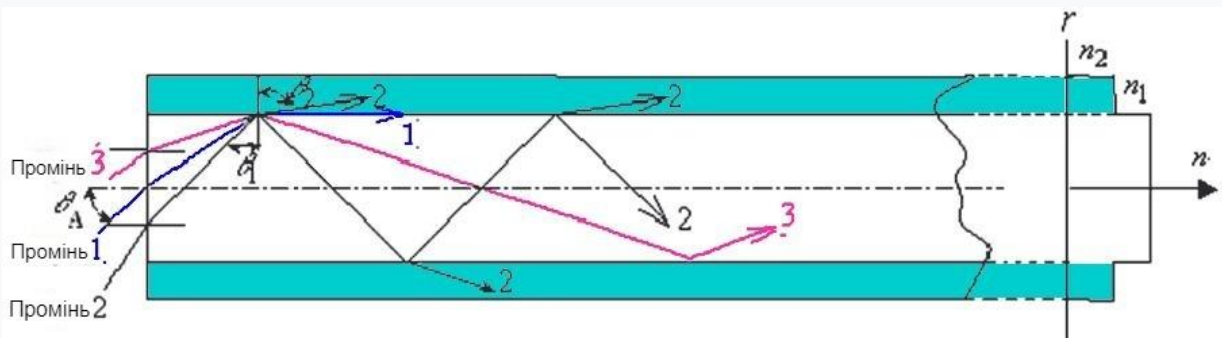


Рисунок 1.2 — Заломлення проміння в оптичному волокні

Теоретично було б можливо використовувати в якості серцевини скляний однорідний стрижень 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 не відбиватися, а випромінюватися зі скла (рис. 1.3) [1].

На практиці передача світла вздовж волокна більш складна, ніж описано вище, оскільки світло насправді поширюється через скло по тривимірній ступінчастою спіралі. Для точного аналізу такого поширення потрібно надзвичайно складний математичний апарат, який не має практичної цінності. Аналіз поширення світла через оптичне волокно буде розглядатися з двовимірної точки зору.

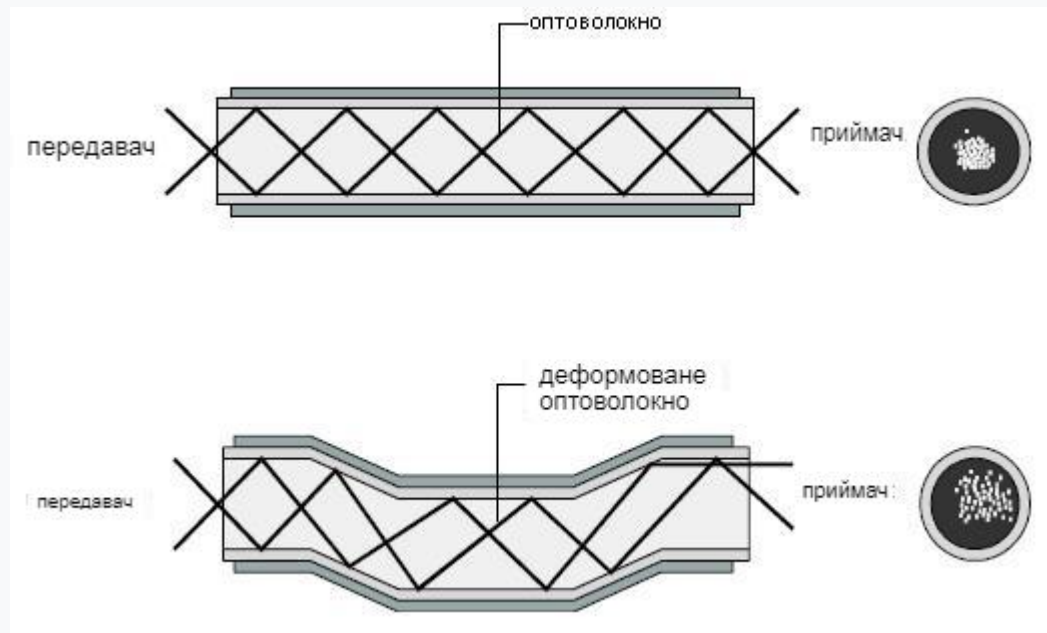


Рисунок 1.3 — Хід променя в деформованому оптоволокну

Серцевину 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.

Основою оптоволоконного кабелю є світлодіод, який виготовляють з кварцового скла. Такий світлодіод називається оптичним волокном, звідси походить назва цих кабелів. Основними параметрами світлодіода є:

- заломлення (дорівнює 1,46);
- коефіцієнт теплопровідності (дорівнює 1,4 Вт/мк);
- щільність (дорівнює 2203 кг/м).

Оптоволокно дає можливість передавати сигнал в діапазоні частот $(2,3—1,2) \cdot 10^{14}$ Гц, при довжині хвилі від 0,85 мкм до 1,6 мкм. Такі показники дозволяють передавати дані на дуже високих швидкостях. Для наочності наведемо приклад: використовуючи тільки соту частку представленого діапазону, можна транслювати 100 тис. телевізійних сигналів або 1 млрд телефонних переговорів.

1.2 Основні характеристики оптичного волокна

Здатність оптичного волокна передавати інформаційний сигнал описується за допомогою ряду геометричних і оптичних параметрів і характеристик, з яких найбільш важливими є загасання і дисперсія.

1. Геометричні параметри. Крім співвідношення діаметрів серцевини і оболонки, велике значення для процесу передачі сигналу мають і інші геометричні параметри оптоволоконна, наприклад:

- некруглість (еліптичність) серцевини і оболонки, що визначається як різниця максимального і мінімального діаметрів серцевини (оболонки), поділена на номінальний радіус, виражається у відсотках;

- неконцентричність серцевини і оболонки — відстань між центрами серцевини і оболонки (рис. 1.4) [3].

Геометричні параметри стандартизовані для різних типів оптичного волокна. Завдяки вдосконаленню технології виробництва значення некруглості і неконцентричності вдається звести до мінімуму, так що вплив

неточності геометрії оптоволоконна на його оптичні властивості виявляється несуттєвим.



Рисунок 1.4 — Некруглість і неконцентричність серцевини і оболонки в оптоволоконні

2. Числова апертура. Числова апертура (NA) — це синус максимального кута падіння променя світла на торець волокна, при якому виконується умова повного внутрішнього відображення (рис. 1.5) [3]. Цей параметр визначає кількість мод, що поширюються в оптичному волоконні. Також величина числової апертури впливає на точність, з якою повинна проводитися стикування оптичних волокон один з одним і з іншими компонентами лінії.

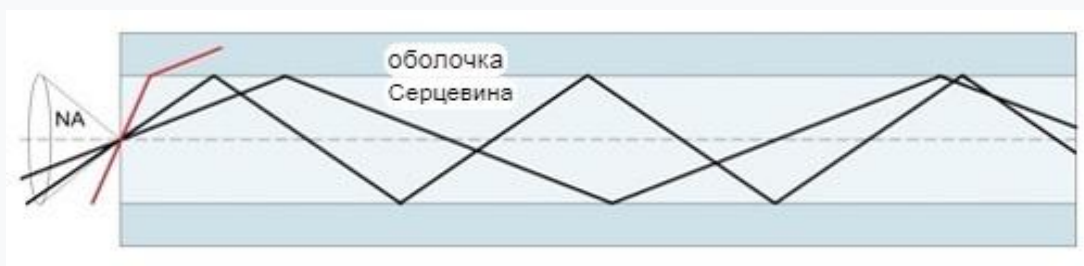


Рисунок 1.5 — Хід променя в оптичному волоконні

1.3 Профіль показника заломлення

Профіль показника заломлення — це залежність показника заломлення сердцевини від її поперечного радіусу. Якщо показник заломлення залишається однаковим у всіх точках поперечного перерізу сердцевини, такий профіль називається ступінчастим. Серед інших профілів найбільшого поширення набув градієнтний профіль, при якому показник заломлення плавно збільшується від оболонки до осі (рис. 1.6) [3]. Крім цих двох основних, зустрічаються і більш складні профілі.

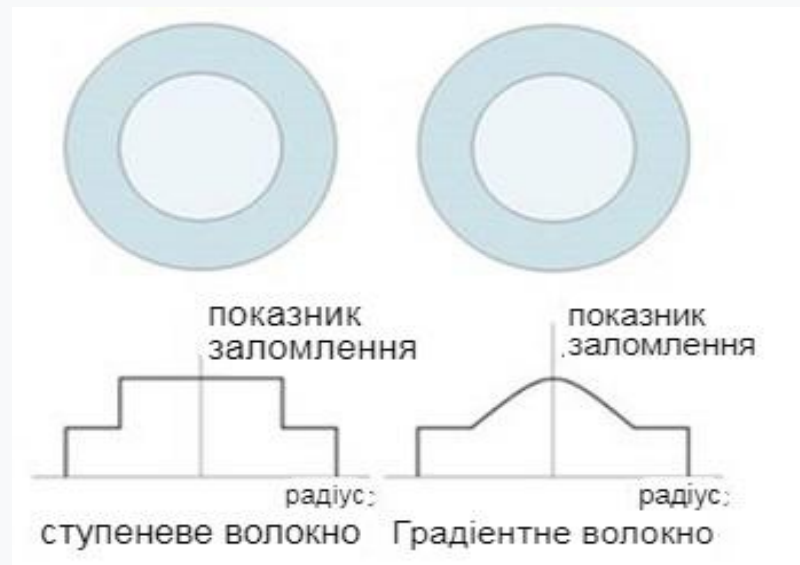


Рисунок 1.6 — Показник заломлення в волокнах

Згасання (втрати) — це зменшення потужності оптичного випромінювання у міру поширення через оптичне волокно (вимірюється в децибелах на кілометр). Загасання виникає внаслідок різних фізичних процесів, що відбуваються в матеріалі, з якого виготовляється оптоволокно. Основними механізмами виникнення втрат в оптичному волокні є поглинання і розсіяння.

Поглинання. В результаті взаємодії оптичного випромінювання з частинками (атомами, іонами ...) матеріалу сердцевини частина оптичної потужності виділяється у вигляді тепла. Розрізняють власне поглинання,

пов'язане з властивостями самого матеріалу і домішкові поглинання, що виникають через взаємодію світлової хвилі з різними включеннями, які містяться в матеріалі серцевини (гідроксильні групи іони металів ...).

Розсіювання світла, тобто відхилення від вихідної траєкторії поширення, відбувається на різних неоднорідностях показника заломлення, геометричні розміри яких менше або можна порівняти з довжиною хвилі випромінювання. Такі неоднорідності є наслідком як наявності дефектів структури волокна (розсіювання Мі), так і властивостями аморфного (некристалічній) речовини, з якого виготовляється волокно (релеєвське розсіювання). Релеєвське розсіювання є фундаментальною властивістю матеріалу і визначає нижню межу загасання оптичного волокна. Існують і інші види розсіювання (Бріллюена-Мандельштама, Рамана), які проявляються при рівнях потужності випромінювання, що перевищують ті, які зазвичай використовуються в телекомунікаціях.

Величина коефіцієнта загасання мають складну залежність від довжини хвилі випромінювання. Приклад такої спектральної залежності наведено на рис. 1.7 [5]. Область довжин хвиль з низьким загасанням називається вікном прозорості оптичного волокна. Таких вікон може бути кілька, і саме на цих довжинах хвиль зазвичай здійснюється передача інформаційного сигналу.

Втрати потужності в волокні обумовлюються також різними зовнішніми факторами. Так, механічні дії (вигини, розтягування, поперечні навантаження) можуть призводити до порушення умови повного внутрішнього відображення на кордоні серцевини і оболонки і виходу частини випромінювання з серцевини. Певний вплив на величину загасання надають умови навколишнього середовища (температура, вологість, радіаційний фон ...).

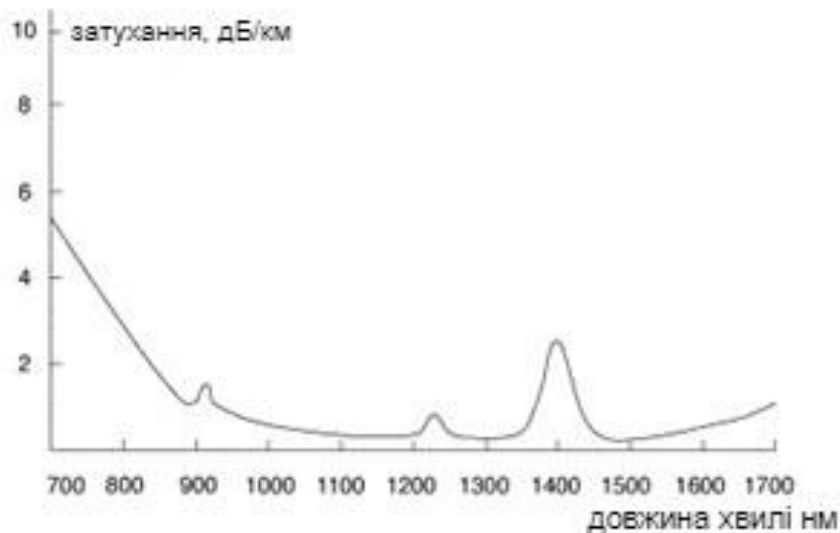


Рисунок 1.7 — Залежність довжини хвилі від затухання

Оскільки приймач оптичного випромінювання має певний поріг чутливості (мінімальну потужність, яку повинен мати сигнал для коректного прийому даних), загасання служить обмежуючим фактором для дальності передачі інформації через оптичне волокно [4].

1.4 Дисперсійні властивості

Дисперсія — це розсіювання в часі спектральних або модових складових оптичного сигналу, яке призводить до збільшення тривалості імпульсу оптичного випромінювання при поширенні його через оптичне волокно.

Дисперсія не тільки обмежує частотний діапазон ОВ, але істотно знижує дальність передачі сигналів, так як чим довше лінія, тим більше збільшення тривалості імпульсів. Вона в загальному випадку визначається трьома основними факторами: розходженням швидкостей поширення направляються мод, направляючими властивостями оптичного волокна і параметрами матеріалу, з якого вона виготовлена. У зв'язку з цим основними причинами виникнення дисперсії є, з одного боку, велика кількість мод в ОВ

(модова або міжмодова дисперсія), а з іншого боку — некогерентність джерел випромінювання, реально працюють в діапазоні довжин хвиль ($\Delta\lambda$) (хроматична дисперсія). Модова дисперсія переважає в багатомодових ОВ і обумовлена відмінністю часу проходження мод по ОВ від його входу до виходу. Механізм появи хроматичної дисперсії зручно описати за допомогою перетворень Фур'є.

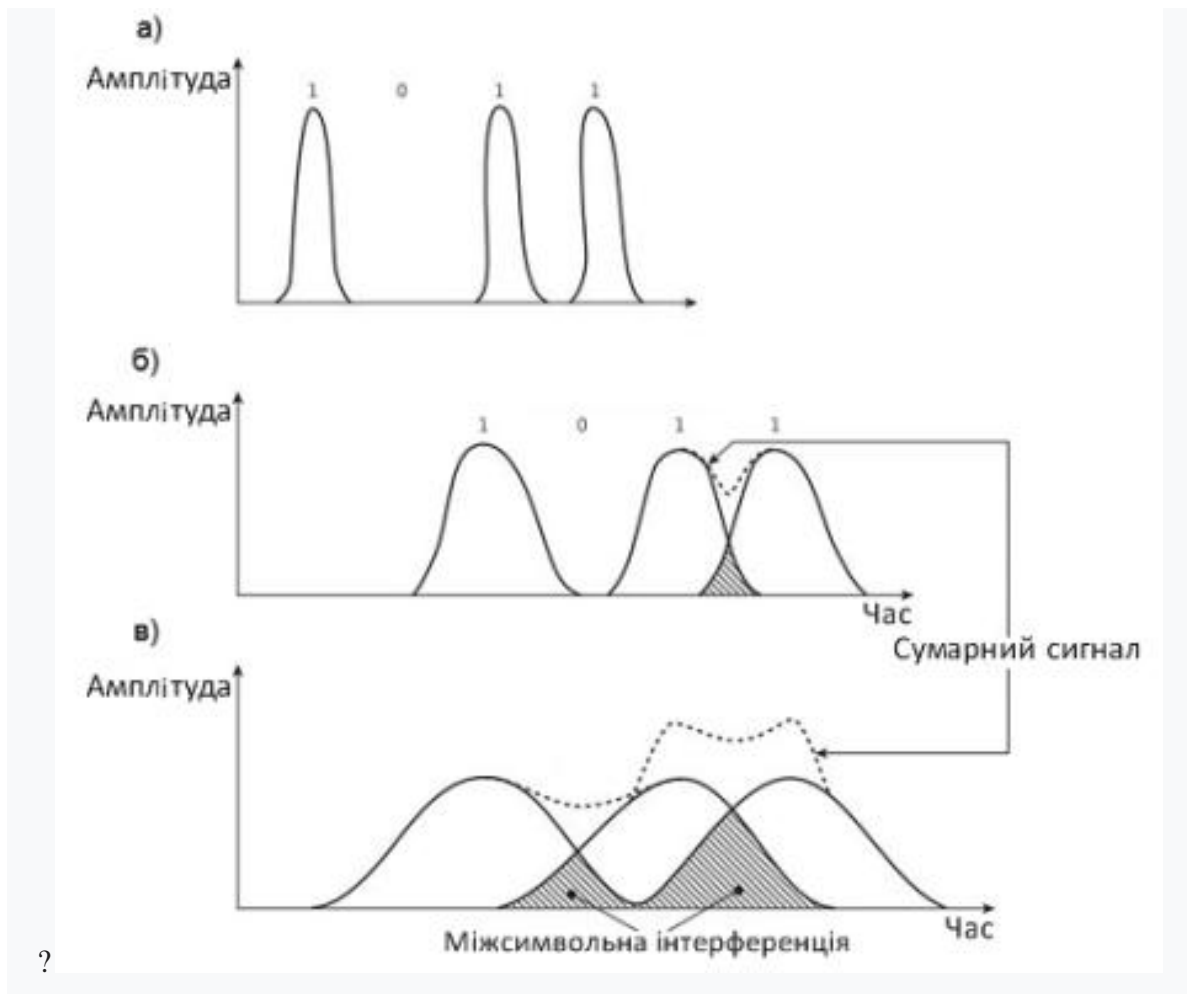
Хроматична (частотна) дисперсія. Дана дисперсія викликана наявністю спектра частот у джерела випромінювання, характером діаграми спрямованості і його некогерентного. Хроматична дисперсія, в свою чергу, ділиться на матеріальну, хвилеводну і профільну (для реальних волокон).

Матеріальна дисперсія. Матеріальна дисперсія, або дисперсія матеріалу, залежить (для прозорого матеріалу) від частоти ω (або довжини хвилі l) і матеріалу ОВ, в якості якого, як правило, використовується кварцове скло.

Дисперсія визначається електромагнітною взаємодією хвилі зі зв'язаними електронами матеріалу середовища, яке носить, як правило, нелінійний (резонансний) характер і лише далеко від резонансів може бути описано з прийнятною точністю, наприклад, рівнянням Селлмейера.

Крім відстані, на яке передається випромінювання через оптичне волокно, важливим параметром є швидкість передачі інформації. Поширюючись по волокну, оптичні імпульси розширюються в часі. При високій частоті проходження імпульсів на певній відстані від джерела випромінювання може виникнути ситуація, коли імпульси почнуть перекриватися в часі (тобто наступний імпульс прийде на вихід оптичного волокна раніше, ніж закінчиться попередній).

Це явище носить назву міжсимвольної інтерференції (англ. ISI — InterSymbol Interference (рис. 1.8) [3]. Приймач обробить отриманий сигнал з помилками.



а) вхідний сигнал;

б) сигнал, що пройшов деяку відстань L_1 через оптичне волокно;

в) сигнал, що пройшов відстань $L_2 > L_1$.

Рисунок 1.8 — Перекриття імпульсів, що викликає міжсимвольні інтерференцію

1.5 Одномодові та багатомодові волокна

1.5.1 Конструктивні відмінності

Два основних параметри оптичного волокна — це світлопровідна серцевина і світлопровідна оболонка. Для більшого розуміння, волокно можна порівняти зі звичайною трубою: стінки труби — світловідбиваючі оболонка, внутрішній простір труби — серцевина.

Отже у многомодового волокна діаметр внутрішнього простору досить великий — 62,5 мкм або 50 мкм, у одномодового всього 9 мкм, тобто в кілька разів менше. Так у багатомодового волокна сигнал складається з багатьох хвиль, які поширюються по досить великому простору, за рахунок цього сигнал сильніше загасає і має порівняно невелику дальність роботи. У одномодових волокон застосований інший принцип — маленький діаметр сердцевини доповнений однією (рис. 1.9), але досить потужною несучою хвилею, дозволяє передати сигнал на відстань до півтори сотні кілометрів без регенерації [5].



Рисунок 1.9 — Діаметри оптичних волокон

1.5.2 Відмінності в дальності сигналу

Оскільки кілька мод/світлових пучків проходять по многомодовому оптоволоконному кабелю, він забезпечує високу пропускну здатність тільки на короткій відстані. При запуску сигналу на довші відстані, модальна дисперсія (спотворення) стає проблемою. Зазвичай це виражається в характеристиці «ефективна модальна смуга пропускання» волокна, яка є зворотною залежністю між шириною смуги пропускання волокна і відстанню

до нього. У міру збільшення смуги пропускання дальність дії зменшується і, навпаки — через ефект модальної дисперсії. В одномодовому волокні весь світ від імпульсу проходить приблизно з однаковою швидкістю і приходить приблизно в один і той же час, усуваючи ефекти модальної дисперсії, які виявлені в багатомодового волокна. Це підтримує більш високі рівні пропускної здатності з меншими втратами сигналу на великих відстанях. Тому одномодове волокно ідеально підходить для передачі сигналів на великі відстані, наприклад, між виробничими філіями, під водою або в віддалені офіси. По суті, для нього немає обмежень по відстані (рис. 1.10) [6].

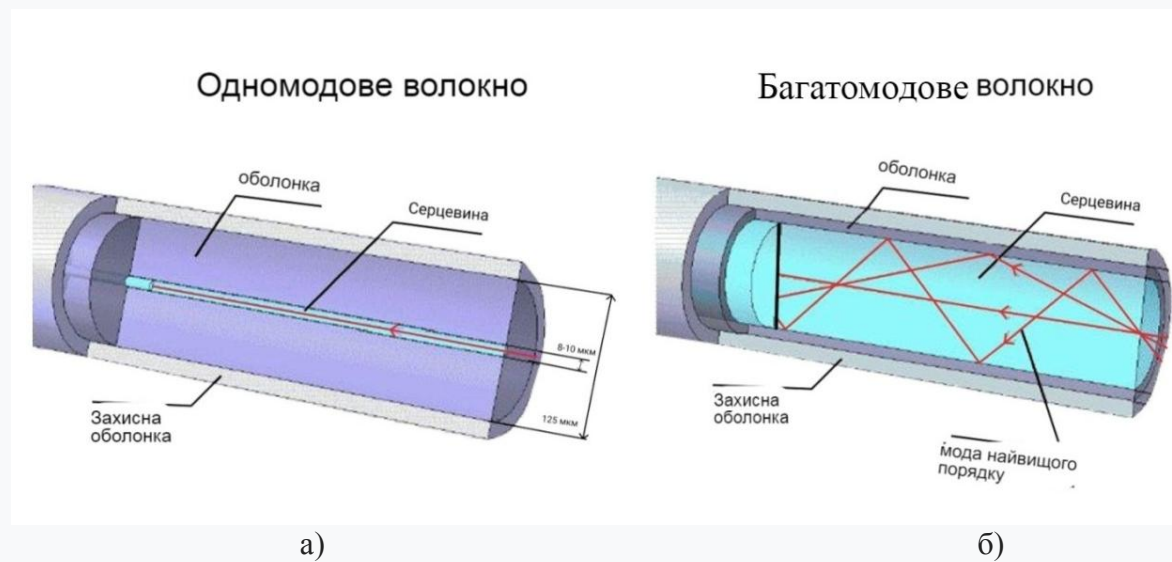


Рисунок 1.10 — Одномодове (а) та багатомодове (б) волокна

1.5.3 Різниця у вартості

На цей час одномодове волокно, як правило, дешевше, ніж багатомодове, але важливо також враховувати і інші цінові фактори. Більшість волоконно-оптичних систем використовують приймачі, які об'єднують передавач і приймач в єдиний модуль, використовуючи оптоволоконну технологію для надсилання та отримання даних по оптичній мережі. Зараз ціна багатомодових трансиверів в два-три рази нижче, ніж ціна

одномодових. Однак у міру зниження цін на трансивери, одномодовий режим все частіше використовується в додатках на короткі відстані в якості економічно ефективного вибору типу кабелів. Сучасні типи одномодового волокна включають в себе:

- стандартне одномодове волокно (G.652);
- одномодове оптоволокно зі зміщеною довжиною хвилі відсічення (G.654);
- волокно з низьким вмістом води;
- одномодове оптоволокно з низьким загасанням на "піку води" ("пік води" розділяє вікна прозорості в смузі пропускання одномодових світловодів в діапазонах 1300 нм і 1550 нм) (G.652);
- волокно зі зміщеною дисперсією (G.653);
- волокно з ненульовим зміщенням дисперсії (G.655);
- волокно не чутливе до вигину (G.657).

Кожен тип одномодового волокна має свої особливості. Залежно від робочої довжини хвилі, відстані і архітектури лінії передачі (яка може включати в себе різні методи посилення), перед вибором необхідно взяти до уваги всі вищеописані особливості.

У міру того як технології волоконної електроніки змінюються і удосконалюються, включаючи модулятори, лазери, фізичні перетворювачі, приймачі і т. д. Також будуть поліпшуватися одномодові і багатомодові оптоволоконні кабелі.

Щоб гарантувати, що ви отримаєте саме те, що вам потрібно, ми рекомендуємо звернутися до наших фахівців, які допоможуть спроектувати оптоволоконну систему на основі ваших бюджетів, кількості мережевих клієнтів і місць розміщення джерел даних і устаткування [7].

1.5.4 Основні положення хвильової теорії передачі світла по оптичних волокнах

Так як світло являє собою електромагнітну хвилю, а її поширення в будь-якому середовищі описується рівняннями Максвелла, поширення світла може розглядатися шляхом визначення розвитку пов'язаних з ним векторів напруженості (\vec{E}) і індукції (\vec{D}) електричного поля, а також векторів напруженості (\vec{H}) і індукції (\vec{B}) магнітного поля. Останні пов'язані між собою і параметрами середовища поширення наступними рівняннями Максвелла, за умови, що провідність середовища $\sigma = 0$.

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \nabla \times \vec{H} = \partial \vec{D} / \partial t, \quad (1.1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = \nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t, \quad (1.2)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}, \quad (1.3)$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}, \quad (1.4)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \nabla \cdot \vec{D} = 0, \quad (1.5)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = \nabla \cdot \vec{B} = 0. \quad (1.6)$$

Діелектрична ε і магнітна m проникності описують матеріали, використовувані в волоконно-оптичних системах передачі (ВОСП), які можуть бути лінійними і нелінійними, ізотропним і анізотропними, однорідними і неоднорідними, дисперсійними і не дисперсійними. У абсолютної більшості матеріалів, використовуваних в ВОСП, $m = m_0$ — магнітна проникність вакууму.

Якщо властивості середовища однакові за різними напрямками, то середу називають ізотропною. Відповідно середовища, властивості яких різні за різними напрямками, називають анізотропними. В ізотропних середовищах вектор поляризації (\vec{P}) і вектор (\vec{E}), вектори (\vec{D}) і (\vec{E}), а також

вектори магнітної поляризації (\vec{M}) і (\vec{H}), вектори (\vec{B}) і (\vec{H}) паралельні, а в анізотропних середовищах вони можуть бути непаралельними. В анізотропних середовищах, по крайній мірі, один з цих параметрів є тензором. У кристалічному діелектрику таким тензором є діелектрична проникність e .

Непаралельність векторів \vec{D} і \vec{E} (а також \vec{P} і \vec{E} в анізотропному середовищі пояснюється тим, що в загальному випадку напрямок виникає в результаті поляризації анізотропного середовища вторинного електричного поля, створеного пов'язаними зарядами речовини, становить певний кут (відмінний від 0 і ρ) з напрямком первинного електричного поля. В ізотропному середовищі електромагнітні властивості, такі як показник заломлення, однакові у всіх напрямках, а \vec{E} та \vec{P} є векторами однакової орієнтації, а так як кварц являє собою ізотропне середовище, ідеально циліндричний оптичне волокно також є ізотропним.

Середовище, показники заломлення якої уздовж двох різних напрямків відповідної системи координат, наприклад, уздовж осей x і y , різні, називається двопроміневе заломлення. Двопроміневе заломлення ряду матеріалів, наприклад ніобата літію, використовується в таких волоконно-оптичних компонентах, як модулятори, ізолятори і настроюються фільтри.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСНИХ РЕЖИМІВ ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДІВ

2.1 Типи і характеристики мод волоконного світловоду (ВС)

Математичний аналіз процесу поширення електромагнітних хвиль в діелектричних хвилеводах способами хвильової оптики ґрунтується на рівняннях Максвелла. Якщо поля вимірюються в часі за законом $(-i\omega t)$, а ВС виготовлені з немагнітних матеріалів, комплексні амплітуди векторів напруженості електричного \vec{E}_m та магнітного \vec{H}_m полів розповсюджуваних мод задовольняють рівнянням:

$$\begin{aligned}\nabla^2 \vec{E}_m + \nabla \left(\frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \vec{E}_m \right) + k^2 \varepsilon \vec{E}_m &= 0, \\ \nabla^2 \vec{H}_m + \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \times \nabla \times \vec{H}_m + k^2 \varepsilon \vec{E}_m &= 0,\end{aligned}\tag{2.1}$$

де $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ — хвильове число у вільному просторі;

ω — кругова частота;

∇ — оператор Гамільтона;

∇^2 — оператор Лапласа;

ε — відносна діелектричної проникності.

При стрибкоподібній зміні діелектричної проникності (наприклад, на межі розділу серцевини і оболонки) складові векторів поля, дотичні до поверхні розділа двох середовищ (індекс s) і нормальні до неї (індекс n), безперервні, тобто:

$$H_{1s} = H_{2s}; E_{1s} = E_{2s}; B_{1n} = B_{2n}; D_{1n} = D_{2n}.\tag{2.2}$$

Для хвилеводів, регулярних по осі z , електромагнітні поля розповсюджуваних хвиль вимірюються уздовж цієї осі за законом $\exp(i\beta z)$, де

β — поздовжня постійна поширення. Поперечні складові векторів поля E_{\perp} і визначаються поздовжніми \bar{E}_z та \bar{H}_z :

$$\begin{aligned}\bar{E}_{\perp} &= -\frac{i}{x^2}(\beta\bar{e}_z \times \nabla_{\perp} \times \bar{E}_z + kZ_0 \nabla_{\perp} \times \bar{H}_z), \\ \bar{H}_{\perp} &= \frac{i}{x^2}(\beta\bar{e}_z \times \nabla_{\perp} \times \bar{H}_z - \frac{k\varepsilon}{Z_0} \nabla_{\perp} \times \bar{E}_z),\end{aligned}\quad (2.3)$$

де $x^2 = k^2 \varepsilon - \beta^2$ — квадрат поперечного хвильового числа;

$Z_0 = 120\pi$ — характеристичний опір вакууму, Ом;

∇_{\perp} — поперечна складова оператора Гамільтона;

\bar{e}_z — одиничний вектор в напрямку осі z .

З іншого боку:

$$\bar{E}_z = \frac{Z_0}{ik} \nabla_{\perp} \times \bar{H}_{\perp}; \bar{H}_z = -\frac{1}{ikZ_0} \nabla_{\perp} \times E_{\perp}.\quad (2.4)$$

Таким чином, для визначення поля хвилі досить знайти або поздовжні \bar{E}_z та \bar{H}_z , або поперечні E_{\perp} та \bar{H}_{\perp} складові поля хвилі. Система рівнянь (2.1) з граничними умовами (2.2), а також співвідношеннями (2.3)—(2.4) являє математичну модель процесу поширення електромагнітних хвиль уздовж регулярних діелектричних хвилеводів із змінною в поперечному перерізі діелектричною проникністю. Зазвичай всі складові компоненти \bar{E}_z та \bar{H}_z , яким в круглому ВС задовольняють рівняння:

$$\Delta_{\perp} H_z + (k^2 \varepsilon - \beta^2) H_z = \frac{d\varepsilon}{dr} \frac{k^2}{x} \times \left(\frac{dH_z}{dr} - \frac{\beta}{kZ_0 r} \frac{dE_z}{d\alpha} \right) + \frac{d\varepsilon}{d\alpha} \frac{k^2}{x^2 r} \times \left(\frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \alpha} + \frac{\beta}{kZ_0} \frac{dE_z}{dr} \right),\quad (2.5)$$

$$\Delta_{\perp} E_z + (k^2 \varepsilon - \beta^2) E_z = \frac{\beta}{x^2 \varepsilon} \left[\frac{d\varepsilon}{dr} \left(\beta \frac{dE_z}{dr} + \frac{kZ_0}{r} \frac{dH_z}{d\alpha} \right) + \frac{1}{r} \frac{d\varepsilon}{d\alpha} \left(\frac{1}{r} \frac{dE_z}{d\alpha} - kZ_0 \frac{dH_z}{d\alpha} \right) \right],\quad (2.6)$$

де $\Delta_{\perp} = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2}$ — поперечна частина оператора Лапласа. Цікавим є окремий випадок осиметричного розподілу діелектричної проникності в поперечному перерізі серцевини, для якого $\frac{d\varepsilon}{d\alpha} = 0$. Крім того, при малій відносній зміні діелектричної проникності ε на довжині хвилі можна наближено вважати похідну $d\varepsilon/dr$ рівну нулю. У цьому наближенні система рівнянь (2.5)—(2.6) розпадається на два незалежних однорідних диференціальних рівняння другого порядку зі змінними коефіцієнтами:

$$\begin{aligned}\Delta_{\perp} H_z + [k^2 \varepsilon(r) - \beta^2] H_z &= 0, \\ \Delta_{\perp} E_z + [k^2 \varepsilon(r) - \beta^2] E_z &= 0.\end{aligned}\tag{2.7}$$

Граничні умови для розглянутого випадку круглого діелектричного хвилеводу вимагають виконання рівностей (2.1) на поверхні розділу серцевина-оболонка і мають вигляд:

$$\begin{aligned}E_z | r = a - 0 &= E_z | r = a + 0; H_z | r = a - 0 = H_z | r = a + 0, \\ E_{\alpha} | r = a - 0 &= E_{\alpha} | r = a + 0; H_{\alpha} | r = a - 0 = H_{\alpha} | r = a + 0.\end{aligned}\tag{2.8}$$

Двомірні рівняння (2.7) в циліндричній системі координат допускають відокремлення змінних і можна представити у вигляді добутку двох функцій $F(r)\Phi(\alpha)$. Функція $\Phi(\alpha)$ визначає залежність по кутовій координаті α і має вигляд: $\exp[i(v\alpha + \alpha_0)]$, де $v = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$; α_0 — початкова фаза. Функція $F(r)$ визначає залежність поля за радіусом, і задовольняє рівнянню:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{dF}{dr} + [k^2 \varepsilon(r) - \beta^2 - \frac{v^2}{r^2}] F = 0.\tag{2.9}$$

Зміни знака ν призводить тільки до зміни поляризації розповсюджувальної моди. Тому далі можна вважати, що $\nu > 0$, і рішення для поздовжніх складових має вигляд:

$$F(r) \exp[i(\nu\alpha + \alpha_0)] \quad (2.10)$$

Для поверхневих мод при $r \rightarrow \infty F(r) \rightarrow 0$, для мод випромінювання при $r \rightarrow \infty |F(r)| < C$ [17]; C — постійна. На кожній частоті ω рівняння (2.9), граничні умови (2.8) і нульові умови на нескінченості можуть задовільнятися лише при дискретних значеннях β , які називаються власними значеннями завдання, а саме задача (2.8)—(2.9) називаються задачею на власні значення. Якщо відомо аналітичне рішення рівняння (2.8), то задовільнюючі граничні умови (2.8), можна в явному вигляді отримати співвідношення для визначення β , яке називається дисперсійним рівнянням. Загалом рівняння має q коренів, кожному з яких відповідає певне рішення рівняння (2.7). Воно називається власним рішенням завдання, а в електродинаміці — власним типом хвилі або модою. У круглому діелектричному хвилеводі моди при $\nu \neq 0$ мають відмінні від нуля всі шість складових поля, тобто є гібридними. Вони позначаються в залежності від структури поля як $HE_{\nu m}$ или $EH_{\nu m}$, де ν — азимутальний, m — радіальний індекси. При $\nu = 0$ можливе поширення TE_{0m} ($E_z = 0$) и TM_{0m} ($H_z = 0$) мод. Вирішуючи дисперсійне рівняння для кожної частоти, визначають залежність $\beta_q(\omega)$ — дисперсійну характеристику (ДХ) моди. При невеликому числі поширюваних мод ДХ і розподілу полів є основними електродинамічними характеристиками регулярного ВС, за якими визначаються групові швидкості мод, хвилева і міжмодова дисперсії, розподіл потужності по перетину ВС і т.д.

Для більшості ВС з малим загасанням числа апертура не перевищує 0,3, величина $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ менше 2,5 % і постійні поширення мод

$TE_{0m}, TM_{0m}, HE_{2m}$ відрізняються незначно. Моді з однаковими β називаються виродженими. У ВС виродилися також моди $HE_{l+1,m}$ и $EH_{l-1,m}$ ($l \geq 2$). Лінійна комбінація вироджених мод представляє лінійно поляризовану моду LP_m з азимутальним l та радіальним m індексами. Поперечні складові електричного і магнітного полів LP моди взаємно перпендикулярні і визначаються як рішення скалярного хвильового рівняння:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\delta \psi}{\delta \rho} + [V^2(f(\rho) - b) - \frac{l^2}{\rho^2}] \psi = 0, \quad (2.11)$$

де ψ — поперечна складова електричного або магнітного поля моди;

$\rho = r/a$; $b = [(\beta/k)^2 - \varepsilon_2]/[\varepsilon_1 - \varepsilon_2]$ — нормована стала поширення моди.

Граничні умови вимагають безперервності ψ і $\frac{\partial \psi}{\partial \rho}$ на межі розділу сердцевини і оболочки:

$$\psi|_{\rho=1-0} = \psi|_{\rho=1+0}, \quad \frac{\partial \psi}{\partial \rho}|_{\rho=1-0} = \frac{\partial \psi}{\partial \rho}|_{\rho=1+0} \quad (2.12)$$

Замість ДХ $\beta(\omega)$ або $\beta(k)$ розглядають нормовані ДХ $b(V)$ або $b(ka)$. Останні не залежать від числової апертури світловода і описують ДХ всіх ВС з однаковим нормованим профілем діелектричної проникності $f(\rho)$ [4].

2.2 Програма COMSOL

COMSOL Multiphysics — це інтегрована платформа для моделювання, що включає в себе всі його етапи: від створення геометрії, визначення механічних властивостей матеріалів і опису фізичних явищ, до налаштування рішення і процесу обробки поста, що дозволяє отримувати точні і надійні результати.

Щоб створювати моделі для спеціалізованих прикладних та інженерних задач, ви можете доповнювати можливості програмного пакету COMSOL Multiphysics® модулями розширення в будь-якому їх поєднанні. Модулі інтеграції дозволяють застосовувати при моделюванні інші інженерні та математичні програмні засоби, що використовуються при розробці пристроїв і процесів. Розроблена модель, яка дозволить перетворити її в додаток для моделювання зі спеціалізованим призначенням для користувача інтерфейсом, який можна буде використовувати поза відділу розробників показана на рис. 2.1.

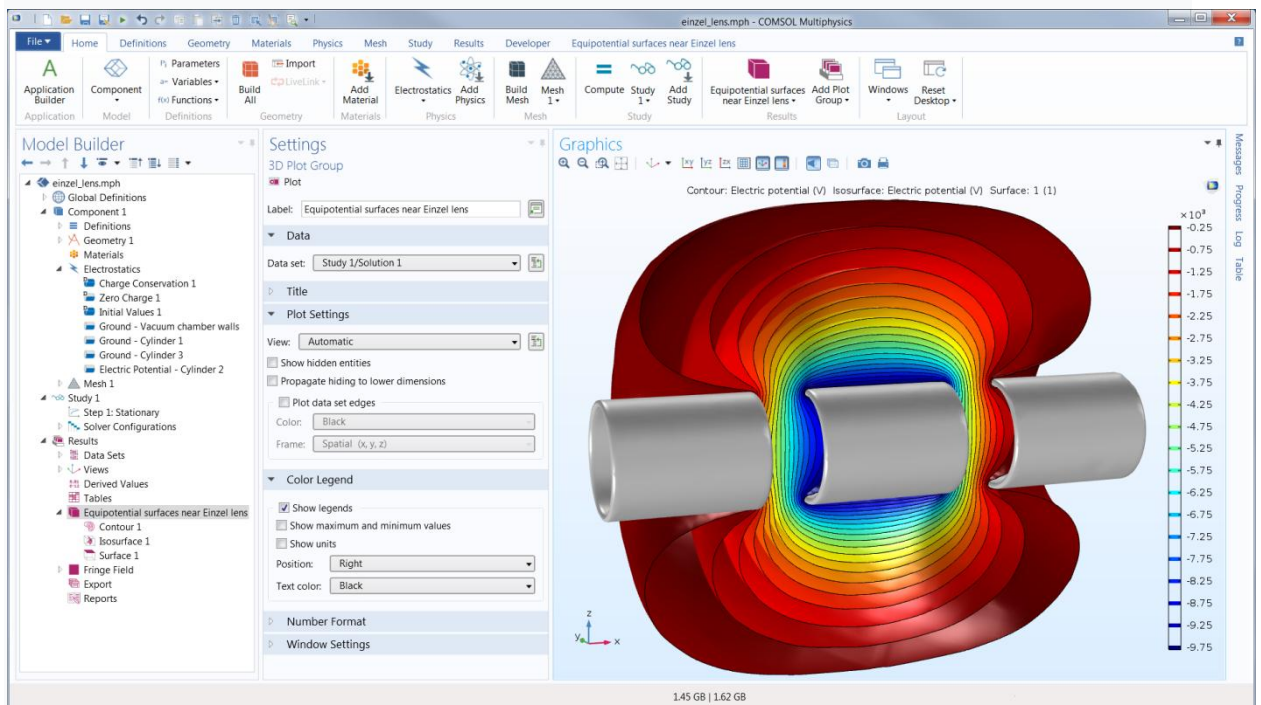


Рисунок 2.1 — Приклад с програми Comsol

Успішні інженерні розрахунки зазвичай засновані на експериментально підтверджених моделях, які можуть замінити до певної міри і фізичні експерименти, і прототипування, і дозволяють краще зрозуміти розроблювану конструкцію або досліджуваний процес. У порівнянні з проведенням фізичних експериментів і випробуванням прототипів

моделювання можна швидше, ефективніше і точніше оптимізувати процеси і пристрої.

Користувачі COMSOL Multiphysics® вільні від жорстких обмежень, які зазвичай властиві пакетам для моделювання, і можуть керувати усіма аспектами моделі. Можна творчо підходити до моделювання і вирішувати завдання, складні або неможливі при звичайному підході, поєднуючи довільне число фізичних явищ і задаючи призначені для користувача опису фізичних явищ, рівнянь і виразів через графічний призначений для користувача інтерфейс (GUI). Точні мультифізичні моделі враховують широкий діапазон робочих умов і великий набір фізичних явищ. Отже, моделювання допомагає розуміти, проектувати і оптимізувати процеси і пристрої з урахуванням реальних умов їх роботи.

Базовий пакет COMSOL Multiphysics® містить інструменти геометричного моделювання для створення елементів геометрії на основі твердих тіл, поверхонь, кривих і булевих операцій. Підсумкова геометрія визначається послідовністю операцій, кожна з яких може отримувати вхідні параметри, що полегшує редагування і параметричні дослідження мультифізичних моделей. Зв'язок між визначенням геометрії і настройками фізики двостороння — будь-яка зміна геометрії автоматично призводить до відповідних змін в пов'язаних налаштуваннях моделі.

Будь-які геометричні об'єкти можна об'єднувати в вибірки (selections) для подальшого використання у визначенні фізики і граничних умов, побудові сіток і графіків. Крім того, послідовність операцій можна використовувати, щоб створити параметризовані геометричну заготовку (geometry part) [8].

2.3 Аналіз результатів чисельних розрахунків

Для дослідження особливостей розповсюдження електромагнітних хвиль (EMX) в оптичних волоконних хвилеводах використовувався пакет мультифізичного моделювання COMSOL. Була розглянута найпростіша

двовимірною моделлю оптичного волокна, яка є досить вірогідною для цього типу лінії передачі. Пакет COMSOL дозволяє розрахувати власні режими електродинамічних систем, які дозволяють зрозуміти основні закономірності розподілу поля в перетині оптичного волокна.

Відомо, що оптично-волоконні хвилеводи можуть бути як одномодовими так і багатомодовими. Ці два різновиди оптичних волокон в основному відрізняються лише діаметром сердцевини, яка має більший показник заломлення ніж оболонка. Розглянемо спочатку одномодовий варіант оптичного волокна. На рис. 2.2 представлена схема поперечного перетину оптичного волокна. В цьому випадку діаметр хвилеводу становить 80 мкм, а діаметр хвилеводу сердцевини 4 мкм. Такі розміри є характерними для одномодових оптичних волокон. Слід зазначити що діаметр оболонки хвилеводу повинен бути достатньо великим для того, щоб забезпечити загасання поля світлових хвиль лише в межах цієї оболонки.

Показник заломлення сердцевини оптичного волокна обирався рівним 1,4457. Такий показник заломлення відповідає спеціальному сорту силіконового скла. Показник заломлення оболонки повинен бути менше за це значення для забезпечення виконання умов повного внутрішнього відбиття на межі розділу сердцевини та оболонки. Спочатку оберемо показник заломлення оболонки рівним 1,4378. Таке значення забезпечує досить високий контраст оптичної щільності двох частин оптичного волокна.

В процесі побудови розрахункової моделі оптичного волокна його перетин покривається так званою розрахунковою сіткою; в кожній комірці якої відбувається розрахунок компонентів електромагнітного поля.

Ця сітка може формуватися автоматично або адаптивно з урахуванням конфігурації електромагнітної системи. В даному випадку ця конфігурація дуже проста, тому використовувалась автоматична побудова розрахункової сітки.

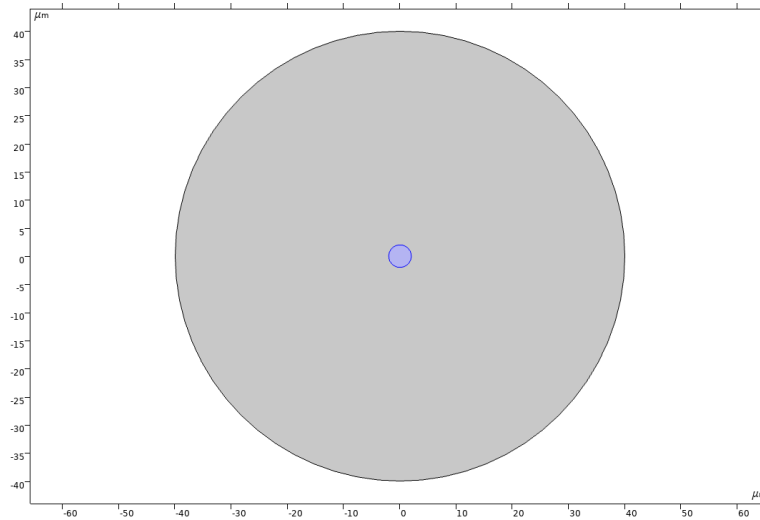


Рисунок 2.2 — Поперечний перетин оптичного волокна

В процесі побудови розрахункової моделі оптичного волокна його перетин покривається так званою розрахунковою сіткою; в кожній комірці якої відбувається розрахунок компонентів електромагнітного поля.

Ця сітка може формуватися автоматично або адаптивно з урахуванням конфігурації електромагнітної системи. В даному випадку ця конфігурація дуже проста, тому використовувалась автоматична побудова розрахункової сітки.

Результат цієї побудови представлений на рис. 2.3 Слід зазначити що зазвичай розмір елементарної комірки вибирається рівним $0,2\lambda$, де λ — довжина хвилі сигналу. В нашому випадку $\lambda = 1,55$ мкм. Крім того при побудові сітки враховується кривизна поверхні що в області серцевини волокна розрахункова сітка значно згущена. Це необхідно для забезпечення точності розрахунків. Для аналізу модового складу волоконного хвилеводу в пакеті COMSOL використовується спеціальний модуль, який дозволяє отримувати електродинамічні характеристики мод цієї структури. Відомо, що різні моди відрізняються просторовим розподілом поля та частотою.

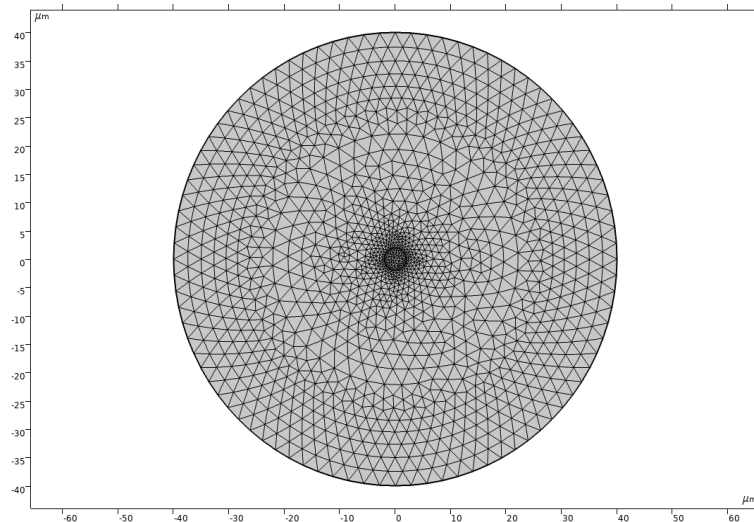


Рисунок 2.3 — Оптичне волокно з розрахунковою сіткою

Для візуалізації результатів розрахунків зручно використовувати енергетичні характеристики електромагнітного поля. Зокрема, на рис. 2.4 представлено двовимірний просторовий розподіл потоку потужності електромагнітного поля (усередненого по періоду коливань).

Рисунок побудований в області біля серцевини волокна. Чорна окружність на рисунку показує границю серцевини волокна. Очевидно, що в цьому випадку практично вся енергія електромагнітного поля хвилі зосереджена в межах серцевини оптичного волокна. Це і є робочий режим одномодового волоконного світловоду. В цьому випадку формується мода з аксіально-симетричним розподілом поля.

На рис 2.5 представлено тривимірний розподіл потоку потужності через весь перетин волокна. Видно, що поле концентрується в центрі цього перетину, тобто в області серцевини. За межами цієї серцевини потужність поля хвилі дуже сильно зменшується до нуля, що дозволяє стверджувати: в цьому режимі енергія практично не виходить за межі оболонки хвилеводу і загасання сигналу обумовлено лише втратами в матеріалі серцевини.

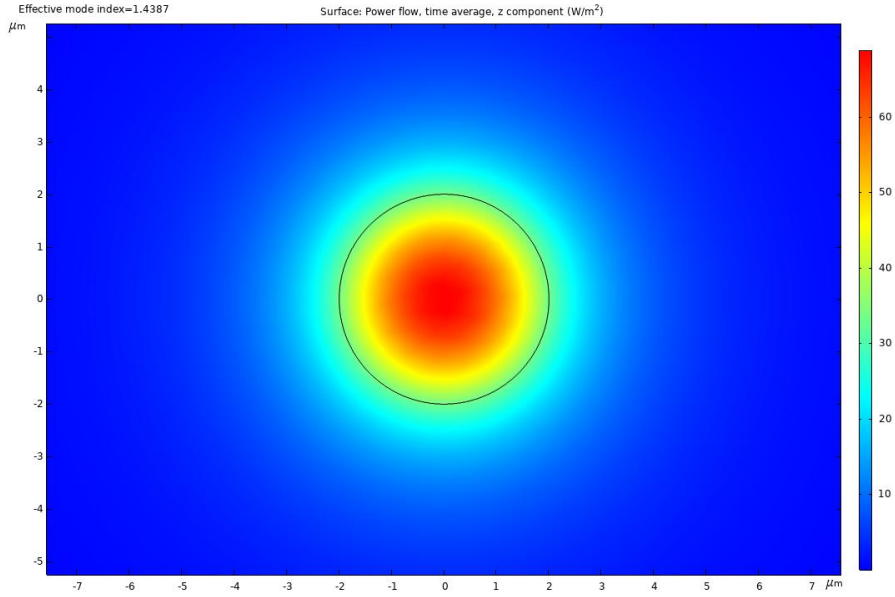


Рисунок 2.4 — Двовимірний просторовий розподіл інтенсивності поля

Surface: Power flow, time average, z component (W/m²) Surface: Electric field norm (V/m)

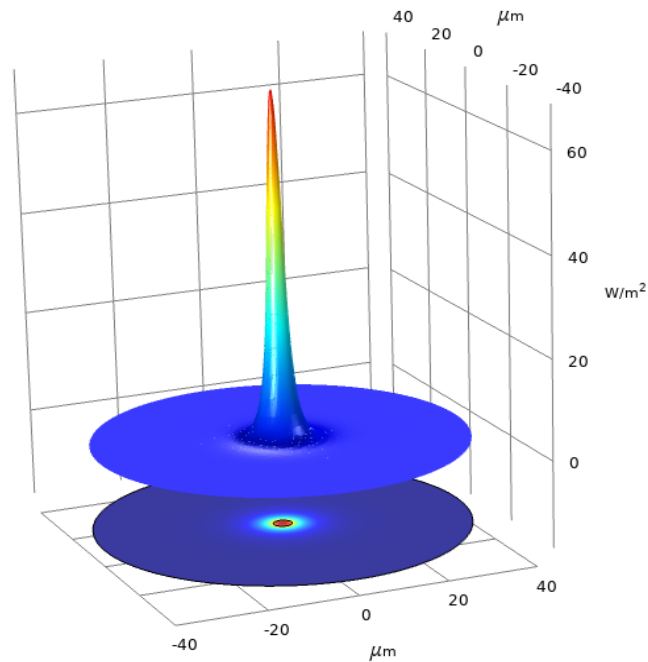


Рисунок 2.5 — Тривимірний розподіл потоку потужності

Розглянемо далі інше значення показника заломлення оболонки оптичного волокна: $N_{\text{clad}} = 1,4403$. Зрозуміло, що в цьому випадку контраст

оптичної щільності серцевини і оболонки зменшується, тому можна очікувати більш інтенсивне просочування енергії електромагнітної хвилі в оболонку хвилеводу. Результати чисельних розрахунків підтверджують цей висновок. На рис 2.6 представлено просторовий розподіл потоку потужності електромагнітного поля волокна. З порівнянням рис 2.4 видно, що в цьому випадку поле більш повільно загасає за межами серцевини оптичного волокна.

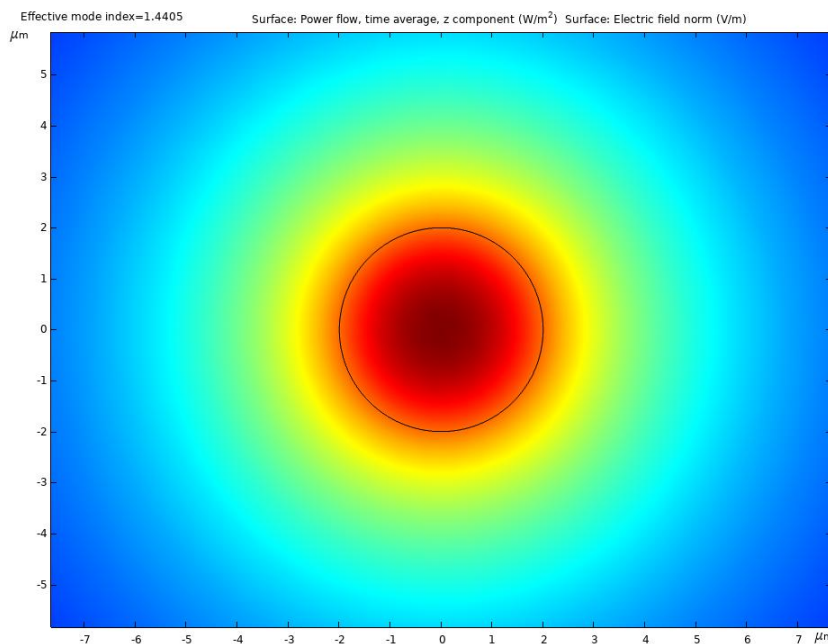


Рисунок 2.6 — Просторовий розподіл потоку потужності

Тобто, воно далі проникає в оболонку. Але завдяки достатнім розмірам оболонка оптичного хвилеводу концентрація поля в його центрі зберігається, що підтверджується рис. 2.5, з якого видно, що навіть при зменшенні контрасту показників заломлення поле практично не виходить за межі оболонки хвилеводу. Однак, оскільки в цьому випадку спостерігається більш інтенсивне проникнення поля в оболонку, то розрахунок власних режимів структури показує наявність інших власних режимів. Просторові розподіли потоків потужності поля, що відповідають цим режимам представлені на рис 2.7.

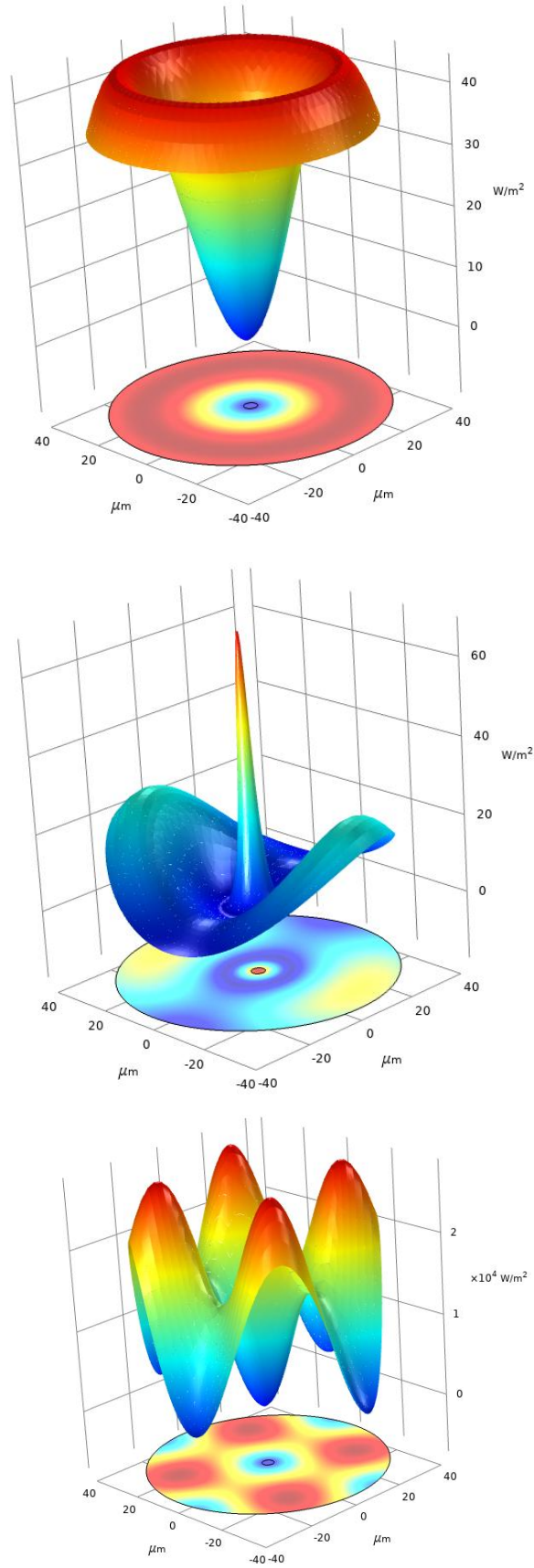


Рисунок 2.7 – Просторові розподіли інтенсивності поля для власних режимів оптичного волокна

З рисунку видно, що поля цих власних режимів охоплює весь перетин оптичного волокна. Це означає, що в оболонці хвилеводу проходить основний потік електромагнітної потужності. Це призведе до значних втрат через випромінювання. Тому такі режими не представляють практичного інтересу.

Таким чином, аналіз розподілу поля в оптичному волокні показав, що зміна контрасту оптичної щільності сердцевини волокна та його оболонки призводить до більш інтенсивного проникнення поля за межі сердцевини. Це необхідно враховувати при проектуванні оптоволоконних ліній передачі.

Розглянемо далі варіант оптоволоконного хвилевода зі збільшеним діаметром сердцевини. На рис 2.8 представлена схема такого волокна.

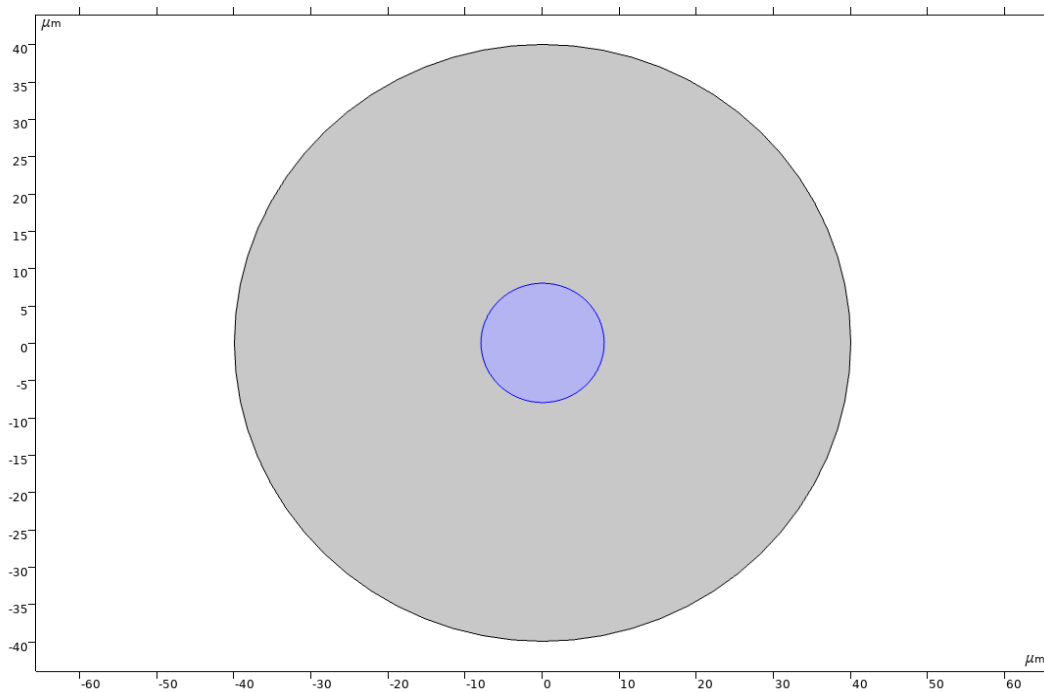


Рисунок 2.8 — Оптоволоконний хвилевід зі збільшеним діаметром сердцевини

Діаметр оболонки такий же як і для попереднього варіанта (80 мкм). Діаметр серцевини волокна складає 16 мкм. Зрозуміло, що при автоматичній побудові розрахункової сітки для такої структури зміниться лише розмір комірок. Дійсно, оскільки діаметри серцевини значно збільшилися, то кривизна межі розділу між оболонкою і серцевиною зменшилась. Тому розмір комірки в центральній частині хвилеводу може бути збільшеним. Це підтверджується результатами побудови розрахункової сітки представленої на рис 2.9.

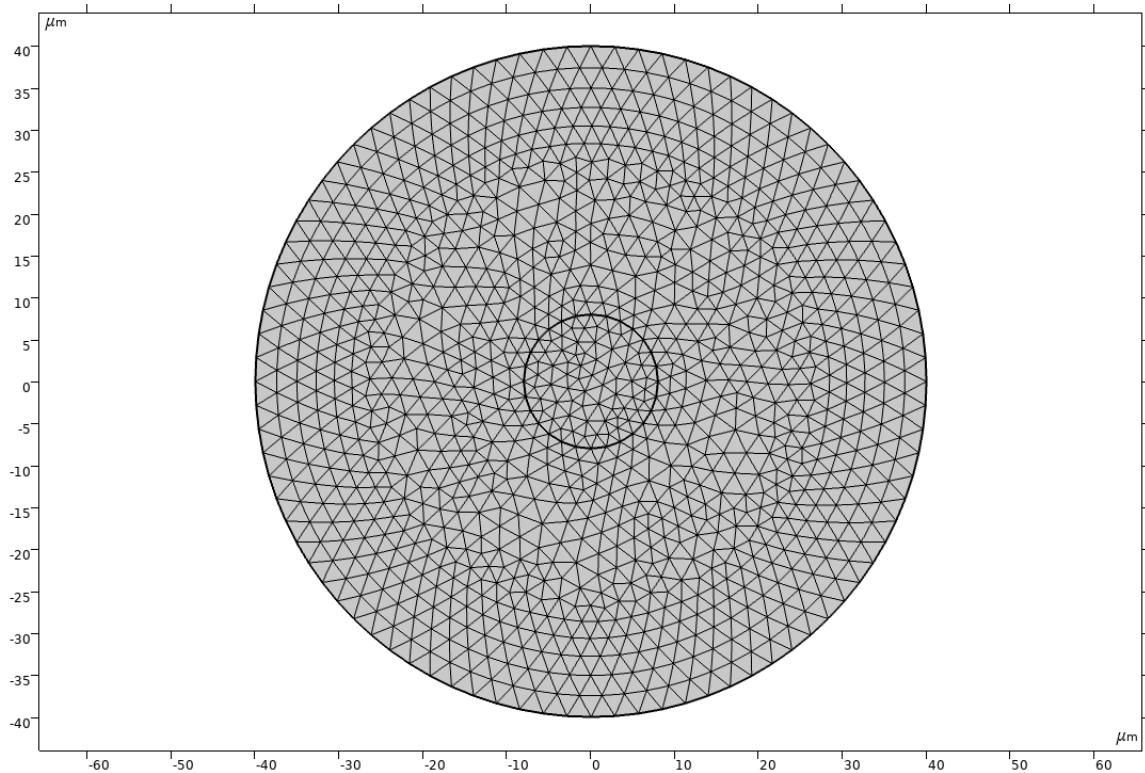


Рисунок 2.9 — Оптичне волокно з розрахунковою сіткою

Очевидно, що конфігурація розрахункової сітки у центральних та зовнішніх шарах оболонки практично не змінилася. В той же час розміри комірок в серцевині оптичного волокна значно збільшилась [9]. Така конфігурація волоконного хвилеводу повинна бути багатоходовою через збільшення діаметру серцевини. Розглянемо далі результати розрахунків

модового складу такого оптичного волокна для різних значень контрасту показників заломлення оболонки та серцевини. Спочатку розглянемо випадок більшого контрасту, коли $N_{\text{clad}} = 1,4378$.

На рис. 2.10 представлено просторовий розподіл усередненого потоку електромагнітної потужності для основної аксіально-симетричної моді хвилеводу.

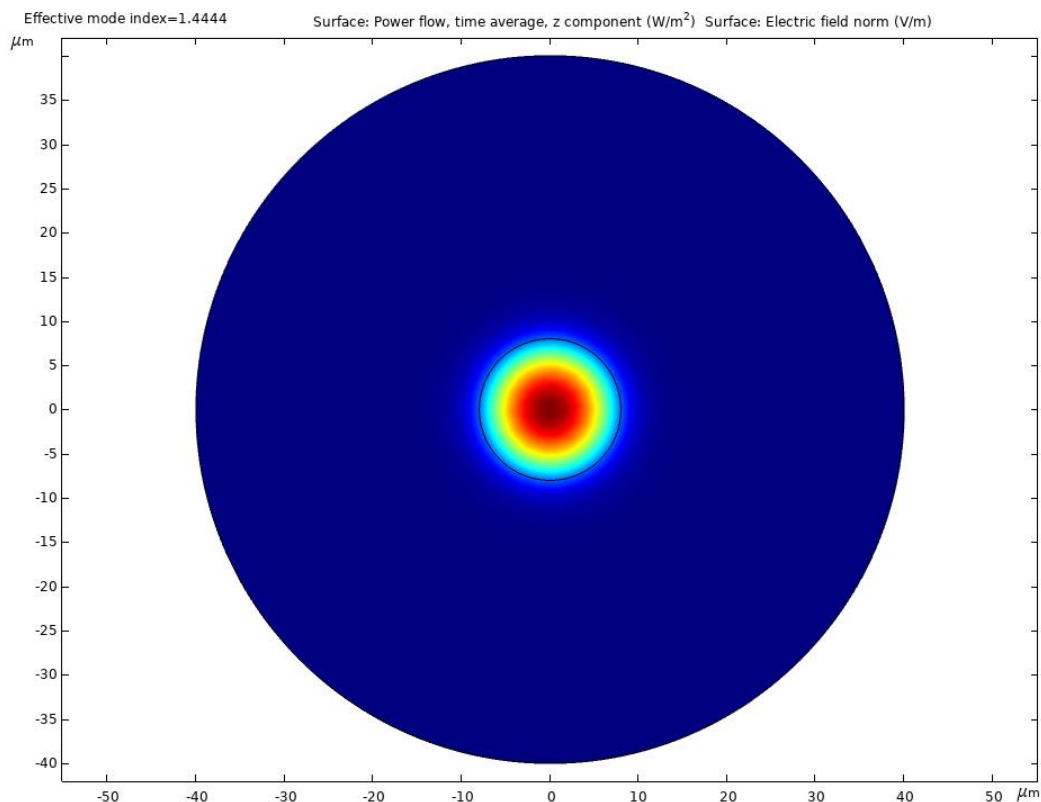


Рисунок 2.10 — Просторовий розподіл усередненого потоку потужності

В цьому випадку розподіл поля практично такий же, як і для одномодового волокна, але добре видно, що загасання поля за межами серцевини хвилеводу є більш інтенсивним. Це досить передбачуваний результат, який добре узгоджується із загальною теорією діелектричних хвилеводів. Відомо що при збільшенні поперечних розмірів діелектричних хвилеводів відносно довжини хвилі поле хвилеводних хвиль сильніше концентрується в перетині хвилеводу. Енергія поля за межами діелектрика

зменшується. Саме така ситуація реалізується в розглянутому випадку, що підтверджується результатами розрахунку тривимірного розподілу поля, представленими на рис 2.11.

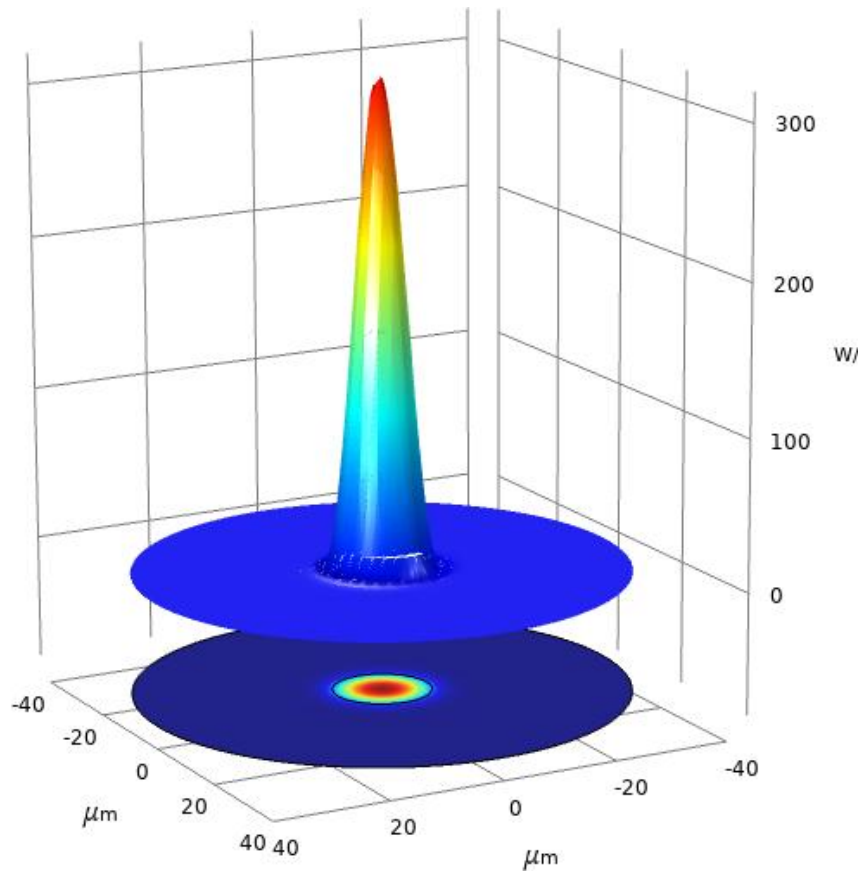


Рисунок 2.11 — Тривимірний розподіл поля

Оскільки ця схема оптичного волокна є багатомодовою, то розрахунки модового складу показують наявність додаткових власних режимів волоконного хвилеводу. Наприклад, на рис. 2.12 представлено просторовий розподіл усередненого потоку електромагнітної потужності для іншої аксіально-симетричної моди. Для цієї моди азимутальний індекс дорівнює нулю, а радіальний індекс дорівнює одиниці. Тобто, в центрі серцевини хвилеводу реалізується мінімум потужності поля на відміну від основної моди, в центрі хвилеводу спостерігається максимум електромагнітної потужності. Крім того з рис 2.12 видно, що поля цієї моди просочуються в

оболонку хвилеводу. Це викликано тим, що максимум інтенсивності зміщується від центру серцевини волокна в бік її краю.

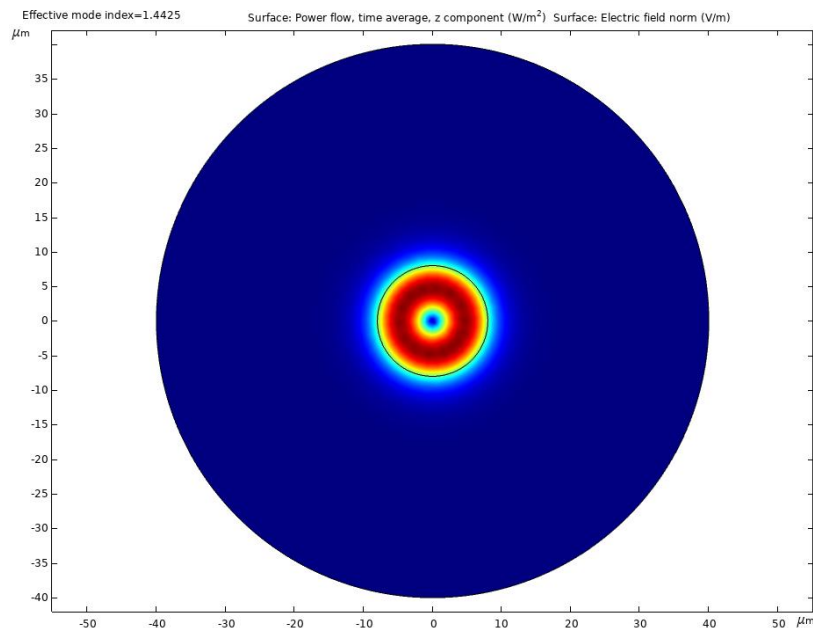


Рисунок 2.12 — Просторовий розподіл поля для аксіально-симетричної моди

На рис 2.13 представлено двовимірний та тривимірний просторові розподіли наступної моди оптичного хвилеводу.

В цьому випадку азимутальний модовий індекс стає відмінним від нуля, оскільки формується варіація розподілу поля не тільки по радіусу а й по азимуту. Однак, з рисунку видно, що для вибраних параметрів розрахункової моделі азимутальні варіації розподілу поля не дуже сильно виражені. Фактично ця мода дуже подібна до попередньої [10].

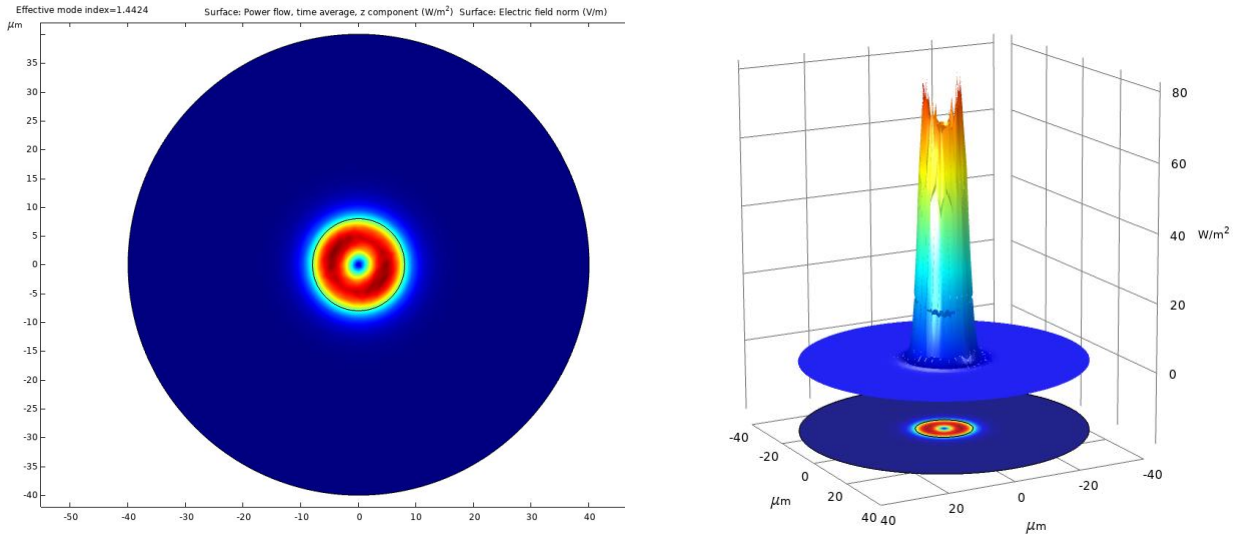


Рисунок 2.13 — Двовимірний та тривимірний просторові розподіли потоку потужності поля

Розглянемо далі варіант оптичного волокна за зменшеним контрастом сердечини та оболонки. В цьому випадку $N_{\text{clad}}=1,4403$.

На рис. 2.14 представлено результати розрахунків для основної моди оптичного хвилеводу [11].

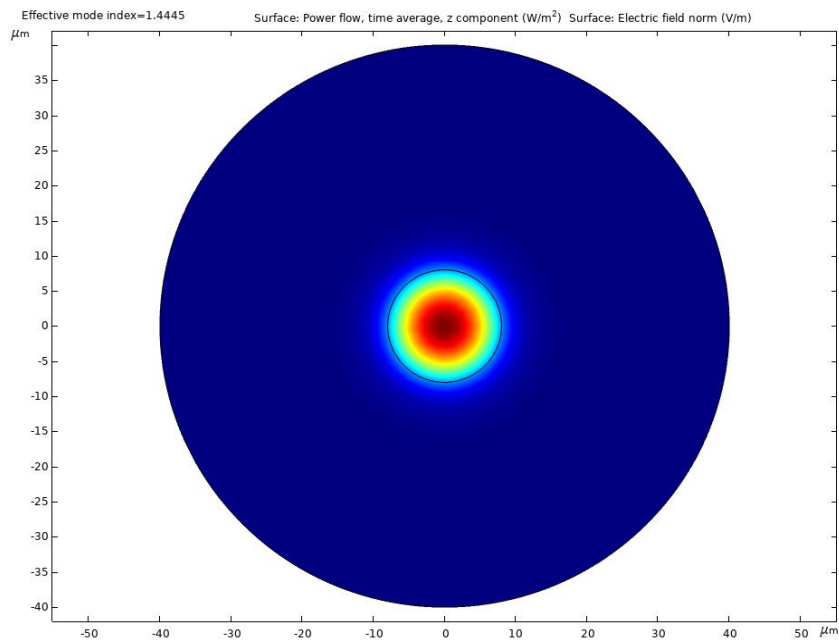


Рисунок 2.14 — Мода оптичного хвилеводу

Порівняння з рис. 2.10 показує, що відмінності у просторовому розподілі поля практично відсутні. Тобто, зміна контрасту показників заломлення для багатомодового оптичного волокна практично не впливає на характеристики основної моди. Ступінь концентрації поля в серцевині хвилеводу практично не змінюється. Це видно також з порівняння рис. 2.11 і рис 2.15, де представлені тривимірні просторові розподіли потоку електромагнітної потужності через оптичне волокно [12].

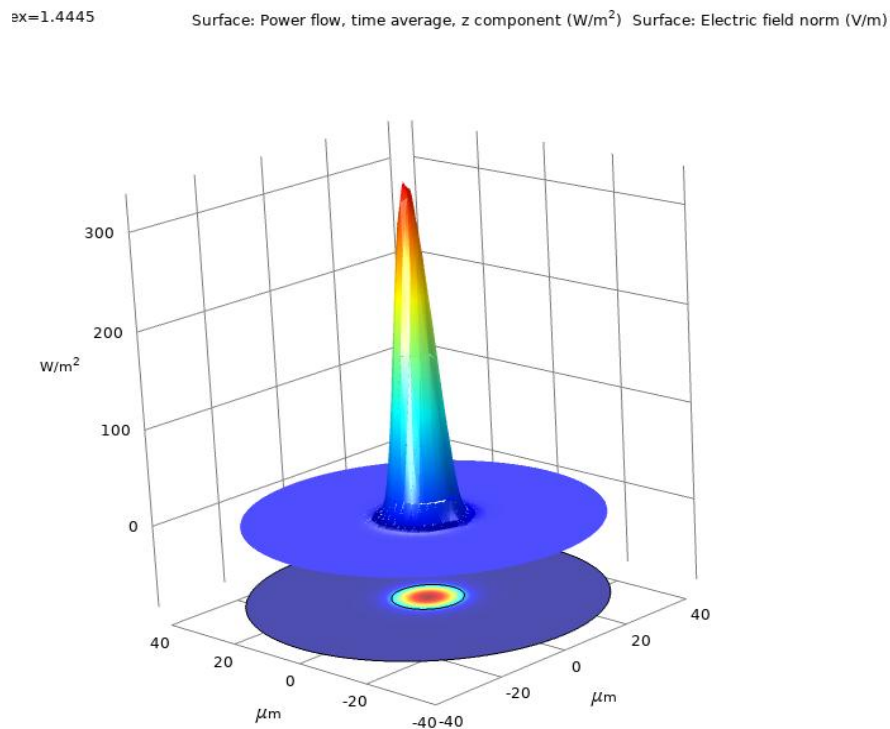


Рисунок 2.15 — Тривимірний просторовий розподіл потоку електромагнітної потужності

Інша ситуація спостерігається для вищих мод хвилеводу. На рис 2.16 представлені просторові розподіли потоку потужності для вищої аксіальної моди з нульовою інтенсивністю поля в серцевині волокна. Порівняння з рис. 2.12 показує, що поле цієї моди більше просочується в оболонку хвилеводу при зменшенні контрасту показників заломлення.

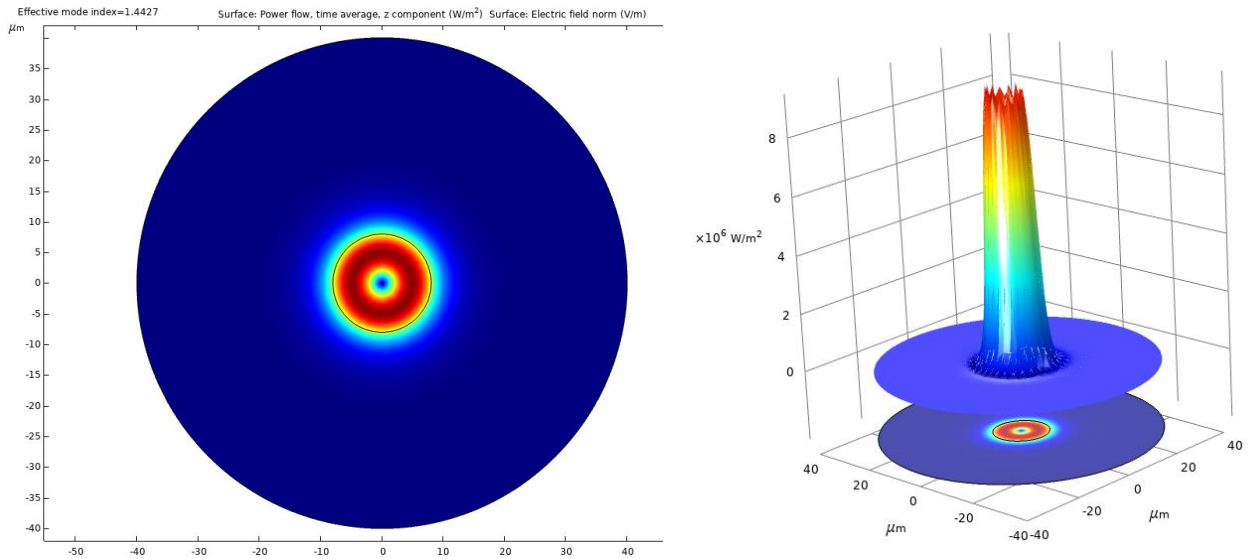


Рисунок 2.16 — Просторові розподіли потоку потужності для вищої аксіальної моди

Найбільші відмінності в конфігурації поля власних режимів волоконного хвилеводу спостерігаються для наступної вищої моди з ненульовими азимутальним та радіальним модовими індексами. Це ілюструється на рис. 2.17.

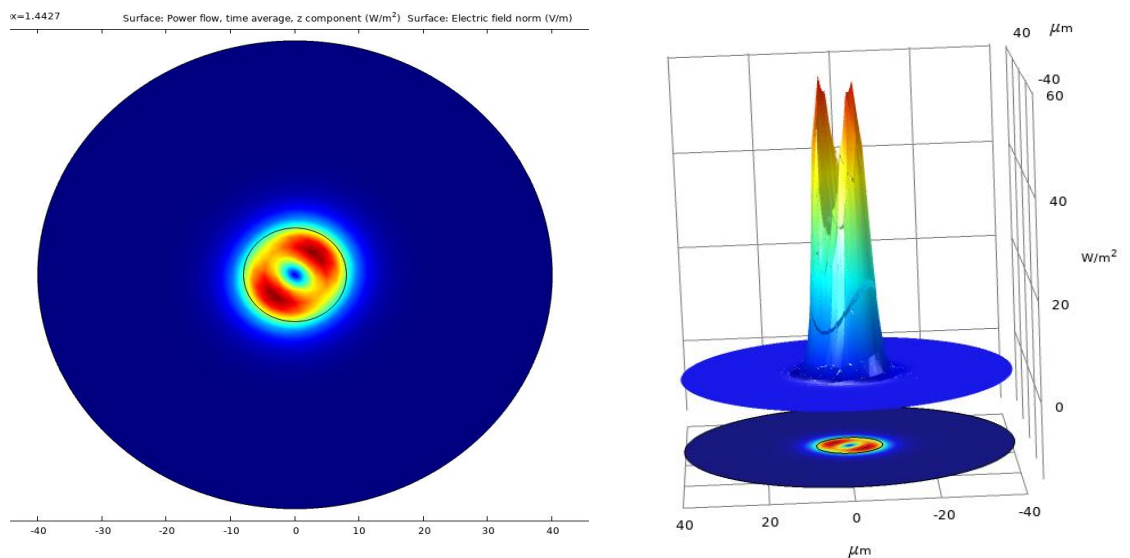


Рисунок 2.17 — Вища моди з ненульовими азимутальним та радіальним модовими індексами

ВИСНОВКИ

В атестаційній роботі проведений аналітичний огляд науково-технічної літератури з питань, що стосуються фізичних властивостей оптоволоконних хвилеводів, їх структури, конструктивного виконання, різновидів.

Проведено ознайомлення з основними методами роботи пакету мультифізичного моделювання COMSOL. Розглянуто способи визначення власних режимів електродинамічних структур.

Складений розрахунковий проект для аналізу власних режимів оптичного волокна з різними наборами параметрів та геометричних розмірів. Цей проект дозволяє визначати модовий склад оптичного волокна.

Проведено чисельні розрахунки характеристик власних режимів оптоволоконних хвилеводів для різних значень матеріальних параметрів серцевини та оболонки волокна, а також геометричних розмірів структури.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1 Белотелов В. И. Фотонные кристаллы и другие метаматериалы. Москва: Бюро Квантум, 2006.
2. Борн М. Вольф Э. Основы оптики. 2-ге вид., переробл. та доп.: пер. с англ. С.Н. Бреуса. Москва: Наука, 1973. 721 с.
3. Ловецкий К. П.. Математический синтез оптических наноструктур: учеб. пособие. Москва: Изд-во РУДН. 2004, 375 с.
- 4 Гапоненко С.В., Гайдук А.А., Кулакович С.А. Оптика наноструктур / под ред. А. Ф. Федорова. Санкт-Петербург: Недра, 2005. 326 с.
5. Наний О. Е., Павлова Е. Г. Фотонно-кристаллические волокна // *Lightwave Russian Edition*. 2004. №3. С. 47—53.
- 6 Kuriazidou C. A., Contopanagos H. F., Alexopolos N. G. Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials // *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. 2001. Vol. 49, № 2.
7. Akahane Y., Mochizuki M., Asano T., Tanaka Y. Design of a channel drop filter by using a donor-type cavity with high-quality factor in a two-dimensional photonic crystal slab // *Appl. Phys. Lett.* 2003. Vol. 2, № 4.
8. Born M., Wolf E. *Foundations of Geometrical Optics*. In *Principles of Optics*. Cambridge: University Press, 1999.
9. *Photonic crystals: molding the flow of light: 2nd edition*. / J. D. Joannopoulos et. al. Princeton University Press, Princeton. NJ, USA, 2008.
10. Stratton A. *Electromagnetic Theory*. New York, NY: MacGraw Hill, 1981, 209 p.
11. Vertiy A. A., Melezhik P. N., Poyedinchuk A. Y. Dielectric Permittivity Profile Reconsctruction in Microwave Band for Layered Dielectric Slab Located in the Standard Metal Waveguide. *International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, MMET*, 2018, 2018-July, P. 217—220, 8460252.

12. Kravchenko V. F., Pavlikov V. V., Vertiy A. A. Multiantenna radiometric system for high resolution imaging: Synthesis of algorithm for optimal UWB signal processing. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2017. 76(8). P. 709—719.