

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНОГО ВОЛОКНА
З РЕШІТКОЮ КАГОМЕ
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,
групи ФТОІм-24-1

Єгор САЄНКО
(Власне ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології

(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма «Фотоніка та оптикоінформатика»
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. каф. ФОЕТ Євген ОДАРЕНКО
(посада, Власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ФОЕТ _____
(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО
(Власне ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____

Кафедра _____ Фізичних основ електронної техніки _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 175 Інформаційно-вимірювальні технології _____
(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 КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Саєнку Єгору Олександровичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання фотонно-кристалічного волокна з решіткою Кагоме

затверджена наказом університету від « 10 » листопада 2025 р. № 1025 Ст _____

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 17 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Геометричні параметри фотонно-кристалічного волокна: діаметр порожнистої серцевини, радіус повітряних отворів, період решітки Кагоме, товщина діелектричних перемичок. Оптичні параметри матеріалу волокна: показник заломлення діелектрика, ефективний показник середовища, оптичні втрати матеріалу.

Довжина хвилі випромінювання для аналізу власних режимів. Тип хвилеводної структури : порожниста серцевина, мікроструктурована оболонка типу Кагоме.

Комп'ютерна модель та програмне забезпечення – COMSOL Multiphysics, модулі Wave Optics та Mode Analysis. Граничні умови моделювання.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1 Проаналізувати фізичні принципи формування фотонно-кристалічних структур та особливості решітки Кагоме. 2 Розглянути класифікацію фотонно-кристалічних волокон і механізми утримання світла в мікроструктурованих хвилеводах. 3 Побудувати двовимірну модель фотонно-кристалічного волокна з решіткою Кагоме в COMSOL Multiphysics.

4 Проаналізувати вплив геометрії оболонки (кількості та розміру повітряних отворів, товщини перемичок) на локалізацію мод.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал – 15 слайдів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про фотонно-кристалічні волокна з решіткою Кагоме та їх характеристики	02.09.25–20.09.25	Виконано
2	Дослідження структур та властивостей фотонно-кристалічного волокна з решіткою Кагоме	25.09.25–05.10.25	Виконано
3	Виконання моделювання та чисельних розрахунків власних мод ФКВ з решіткою Кагоме	10.10.25–18.10.25	Виконано
4	Аналіз отриманих власних мод, ефективних індексів та розподілів поля	22.10.25–25.10.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	30.10.25–11.11.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	14.11.25–20.11.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки тексту КВР на унікальність	26.11.25–08.12.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	10.12.25–13.12.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	15.12.25–18.12.25	Виконано

Дата видачі завдання 02 вересня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. каф. ФОЕТ Євген ОДАРЕНКО
(підпис) (посада, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 56 с., 32 рис., 1 додаток, 20 джерел.

ВЛАСНІ РЕЖИМИ, ЕФЕКТИВНИЙ ІНДЕКС МОДИ, МІКРОСТРУКТУРОВАНІЙ ХВИЛЕВІД, ПРОСТОРОВИЙ РОЗПОДІЛ ПОЛЯ, ПУСТОТІЛА СЕРЦЕВИНА, РЕШІТКА КАГОМЕ, ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНЕ ВОЛОКНО.

Об'єкт дослідження – фотонно-кристалічне оптичне волокно з решіткою Кагоме та порожнистою серцевиною.

Мета роботи – моделювання та аналіз власних режимів фотонно-кристалічного волокна з решіткою Кагоме, визначення ефективних індексів мод та впливу геометрії оболонки на локалізацію електромагнітного поля.

Метод дослідження – чисельний експеримент із застосуванням програмного пакета COMSOL Multiphysics, модулів Electromagnetic Waves, Frequency Domain та Mode Analysis.

У роботі побудована двовимірна модель фотонно-кристалічного волокна з періодичною мікроструктурованою оболонкою типу Кагоме. Проведено чисельні розрахунки власних режимів хвилеводу, отримано просторові розподіли електромагнітного поля для основної та вищих мод, а також визначено відповідні ефективні індекси. Проаналізовано вплив кількості та геометрії повітряних отворів оболонки на ступінь локалізації моди в порожнистій серцевині. Показано, що навіть за відсутності класичної фотонної забороненої зони структура забезпечує ефективне утримання світла завдяки низькому перекриттю мод серцевини та оболонки. Результати роботи можуть бути використані для проєктування оптичних волокон нового покоління для спектроскопії, сенсорики, телекомунікацій та високопотужних лазерних систем.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 56 p., 32 fig., 1 applications, 20 sources.

EFFECTIVE MODE INDEX, EIGENMODES, FIELD DISTRIBUTION, HOLLOW CORE, KAGOME LATTICE, MICROSTRUCTURED WAVEGUIDE, PHOTONIC CRYSTAL FIBER.

Object of study – a photonic-crystal optical fiber with a Kagome-type microstructured cladding and a hollow core.

Purpose of the work – to model and analyze the eigenmodes of a Kagome-lattice photonic-crystal fiber, determine the effective mode indices, and investigate the influence of cladding geometry on the localization of the electromagnetic field.

Research method – numerical simulation using COMSOL Multiphysics, employing the Electromagnetic Waves, Frequency Domain and Mode Analysis modules.

A two-dimensional computational model of a photonic-crystal fiber with a periodic Kagome microstructured cladding has been developed. Numerical calculations of the eigenmodes of the waveguide were performed, and spatial distributions of the electromagnetic field for the fundamental and higher-order modes were obtained, along with their corresponding effective indices. The influence of the number and geometry of air holes in the cladding on the degree of mode localization in the hollow core was analyzed. It is shown that the structure provides efficient light confinement even in the absence of a classical photonic bandgap, due to the reduced overlap between core and cladding modes. The results can be used for designing next-generation optical fibers for spectroscopy, sensing, telecommunications, and high-power laser applications.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	7
Вступ.....	8
1 Фотонно-кристалічне волокно та решітка КагOME	9
1.1 Фотонно-кристалічне волокно	9
1.2 Класифікація фотонно-кристалічних волокон	10
1.3 Принцип роботи фотонно-кристалічного волокна	11
1.4 Технологічні переваги фотонно-кристалічного волокна.....	12
1.5 Застосування фотонно-кристалічних волокон	14
1.6 Виклики та перспективи розвитку фотонно-кристалічного волокна ...	16
1.7 Решітки КагOME	18
1.8 Волоконні хвилеводи з решіткою КагOME	18
1.9 Особливості полімерних оптичних волокон	24
1.10 Плоскі енергетичні зони у решітці КагOME	26
1.11 Діракові конуси та топологічні властивості.....	27
1.12 Решітка КагOME в фотоніці.....	29
1.13 Перспективи досліджень	32
2 Моделювання фотонно-кристалічного волокна з решіткою КагOME.....	34
2.1 Побудова моделі в пакеті COMSOL.....	34
2.2 Аналіз результатів розрахунків	42
Висновки	53
Перелік джерел посилання	55
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	57

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ВОК – волоконно-оптичний кабель;

МОВ – мікроструктуроване оптичне волокно;

ПММА – поліметилметакрилат;

ФКВ – фотонно-кристалічне волокно.

ВСТУП

Фотонні кристалічні волокна (ФКВ) стають все більш важливими в сучасній фотоніці та оптичних комунікаціях. Структура ФКВ, нового класу оптичних хвилеводів, визначається періодичним розподілом показника заломлення поперечного перерізу. Поширення світла у фотонних кристалічних волокнах регулюється фотонною забороненою зоною або контрольованим ефектом відбиття в періодичній мікроструктурі, на відміну від звичайних скляних або полімерних волокон, де світло обмежується різницею показників заломлення між серцевиною та оболонкою.

Особливий інтерес представляють волокна з решіткою КагOME, геометрія якої нагадує старовинний японський візерунок з шестикутних і трикутних комірок. Низькі втрати, широкий спектральний діапазон передачі та контроль дисперсії – це лише деякі з особливих оптичних якостей, які забезпечує така структура. Крім того, волоконні кристали з решіткою КагOME часто належать до категорії волокон з порожнистою серцевиною, що значно мінімізує оптичні втрати та нелінійні ефекти, дозволяючи більшій частині світлової енергії поширюватися в повітряній порожнині, а не в матеріалі.

Ці характеристики роблять волоконні оптичні кристали з решіткою КагOME корисними для застосувань, що вимагають дуже стабільних і низькодисперсійних каналів передачі світла, таких як спектроскопія, сенсорні технології, лазерні системи високої потужності та оптичні лінії зв'язку наступного покоління.

1 ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНЕ ВОЛОКНО ТА РЕШІТКА КАГОМЕ

1.1 Фотонно-кристалічне волокно

Фотонно-кристалічне волокно – це вид оптичного волокна, який має структуровану оболонку з регулярною діелектричною формою для контролю руху світла (рис. 1.1).

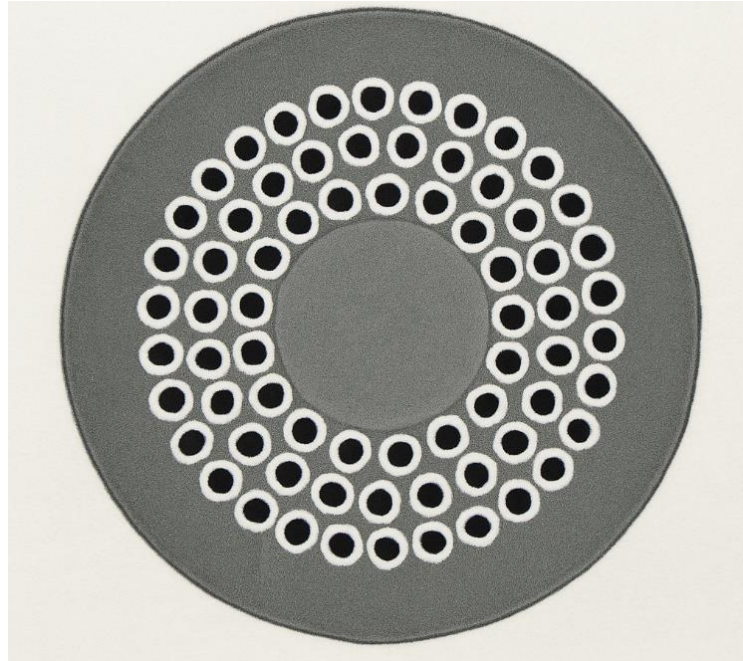


Рисунок 1.1 – Схема перетину фотонно-кристалічного волокна

Головною частиною ФКВ є періодична решітка повітряних отворів, що розташована вздовж волокна і створює фотонну заборонену зону – область частот, де світло не може проходити в певні напрямки. На відміну від звичайного оптичного волокна, яке працює на основі внутрішнього відбиття, ФКВ дає змогу управляти полем світла завдяки фотонним впливам у періодичному середовищі. ФКВ може мати як твердий, так і порожній центр. У порожньому центрі світло зберігається за допомогою заборонених зон, що не дозволяють пройти фотонам, що дає змогу передавати світло навіть в місцях з нижчим показником заломлення ніж у оболонці хвилеводу.

1.2 Класифікація фотонно-кристалічних волокон

Залежно від методу керування поширенням світла, фотонно-кристалічні волокна поділяються на два основні типи. Перший тип – це волокна з індексним керуванням, де світло утримується завдяки вищому показнику заломлення в серцевині, ніж в оболонці (рис. 1.2). Цей метод схожий на звичайні оптичні волокна, але завдяки мікроструктурованій оболонці ці волокна мають кращі можливості для управління модовим складом і дисперсією. Другий тип – це волокна з фотонною забороненою зоною, де світло може залишатися в середині з більш низьким показником заломлення або навіть в порожній серцевині, наповненій повітрям [1].

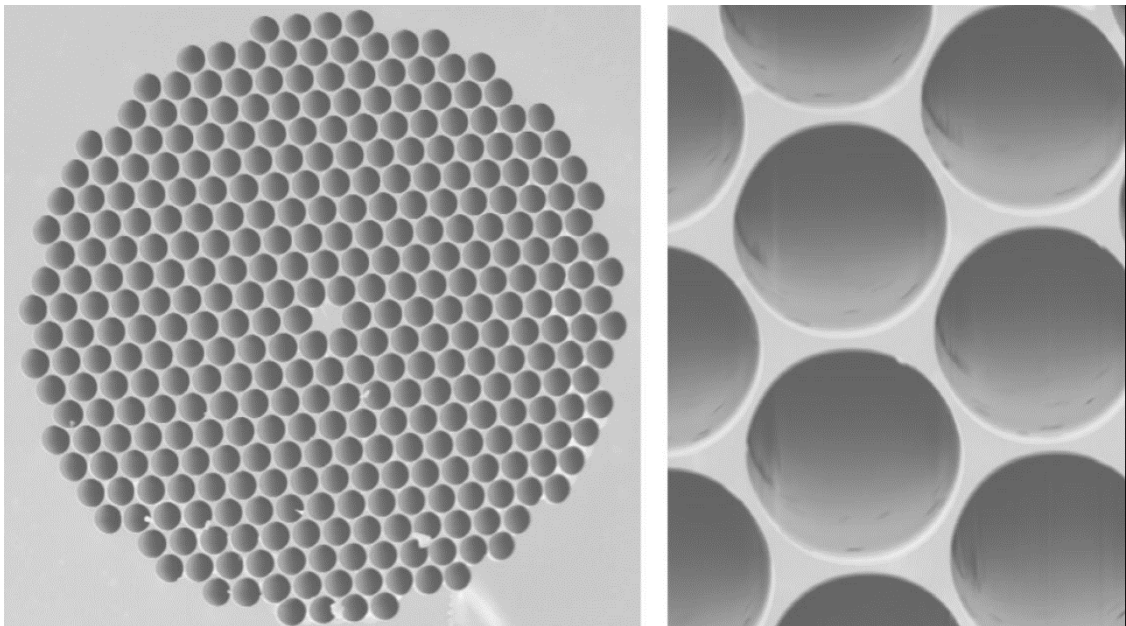


Рисунок 1.2 – SEM-зображення класичного ФКВ з гексагональною решіткою повітряних пор

В цьому випадку утримання світла забезпечується фотонною забороненою зоною, що виникає внаслідок періодичної структури оболонки, яка не пропускає випромінювання певних частот, тим самим ізолюючи світло всередині ядра.

1.3 Принцип роботи фотонно-кристалічного волокна

Основна ідея фотонно-кристалічного волокна полягає в регулюванні пропускання світла шляхом регулярної зміни структури показника заломлення поперечного перерізу волокна (рис. 1.3).

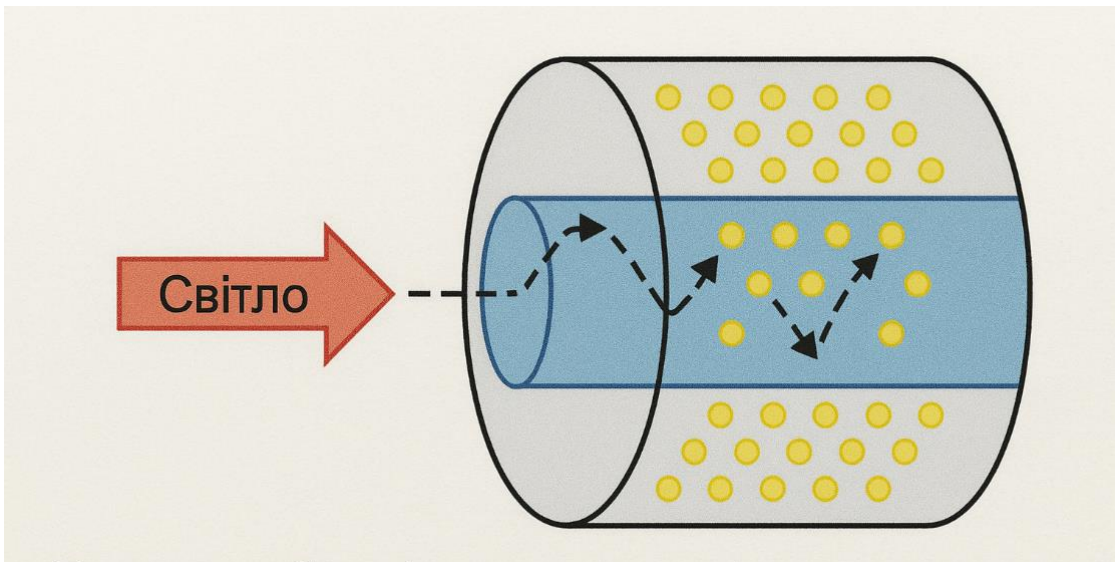


Рисунок 1.3 – Принцип роботи фотонно-кристалічного волокна

Завдяки такій структурі в просторі існує фотонна смуга пропускання - діапазон частот, в якому електромагнітні хвилі не можуть поширюватися в певних напрямках.

Ця характеристика дозволяє ФКВ утримувати світло в активній зоні навіть тоді, коли більш традиційні методи, такі як повне внутрішнє відбиття, є неефективними. На практиці це досягається шляхом оточення серцевини волокна мікροструктурованою оболонкою. Найпоширенішим видом є ефективна фотонна решітка з гексагональної решітки повітряних отворів у склі. Умови для утворення заборонених зон, які нагадують зонну структуру електронів у напівпровідниках, виникають завдяки періодичній модуляції діелектричних властивостей оболонки.

Два основні механізми у фотонному кристалічному волокні, які гарантують утримання світла в серцевині, базуються на ідеї просторової модуляції оптичних характеристик матеріалу. Оскільки серцевина має вищий показник заломлення, ніж оболонка, світло залишається в серцевині завдяки першому механізму, відомому як контроль індексу. Мікроструктурована оболонка фотонно-кристалічного волокна дозволяє точно контролювати склад мод і хроматичну дисперсію, що розширює функціональність волокна на відміну від звичайного оптичного волокна, де поширення світла визначається виключно контрастом показників заломлення [2].

Другий механізм – це утримання світла через фотонну заборонену зону, яка є результатом періодичної структури оболонки. У цьому випадку серцевина може повністю складатися з повітря або мати ще нижчий показник заломлення, ніж оболонка. Оскільки оболонка ефективно створює оптичну пастку, блокуючи проходження певних частот, світло, яке намагається поширюватися вбік, «відкидається назад». Ці механізми уможливають просторове керування поширенням хвиль у фотонному кристалічному волокні, забезпечуючи високу точність формування сигналу, його поляризації та спектральних характеристик. Тому такі волокна є дуже перспективними для використання у високотехнологічних галузях, таких як сенсорні технології, телекомунікаційні системи та оптоелектроніка.

1.4 Технологічні переваги фотонно-кристалічного волокна

У порівнянні зі звичайним оптичним волокном, фотонно-кристалічне волокно має кілька значних технологічних переваг, які значно розширюють його можливості. Здатність гнучко керувати дисперсійними характеристиками є однією з головних переваг. Нульова або навіть аномальна дисперсія в широкому спектральному діапазоні може бути досягнута шляхом ретельного планування мікроструктури оболонки, що особливо корисно для імпульсної оптики, нелінійних застосувань і високошвидкісної передачі даних.

Ще однією важливою перевагою є можливість реалізувати одномодовий режим у широкому спектрі довжин хвиль. ФКВ є дуже ефективним способом передачі даних в телекомунікаційних системах, оскільки вони дозволяють передавати сигнали з високою стабільністю і низькими втратами. Крім того, структура волокна дозволяє добре контролювати поляризацію світла, що є перевагою для систем когерентної передачі сигналів і точних оптичних вимірювань.

Висока стійкість до вигинів і втрат від мікрозгинів є додатковими характеристиками ФКВ. Стабільна робота в обмеженому просторі, наприклад, в промислових або медичних пристроях, забезпечується мікроструктурою оболонки, яка надійно утримує світло в серцевині навіть при екстремальних викривленнях волокна.

На особливу увагу заслуговує потенціал інженерної модифікації фотонних кристалічних волокон для підвищення їхньої чутливості до зовнішніх впливів. Для створення надзвичайно чутливих сенсорів та оптичних компонентів зі спеціальними властивостями волокно можна заповнювати газами чи рідинами або використовувати як порожнистий хвилевід для високоінтенсивного лазерного випромінювання. Схема такого хвилеводу представлена на рис. 1.4, де чорний колір позначає діелектрик, а білий колір – повітря.

Крім того, порожнисті ФКВ мають значно менші теплові втрати і нелінійні ефекти, що робить їх придатними для передачі потужних імпульсів без погіршення якості сигналу. Ці характеристики призвели до поступової інтеграції ФКВ у складні телекомунікаційні системи, біомедичні пристрої, лазерні системи і системи спектроскопії.

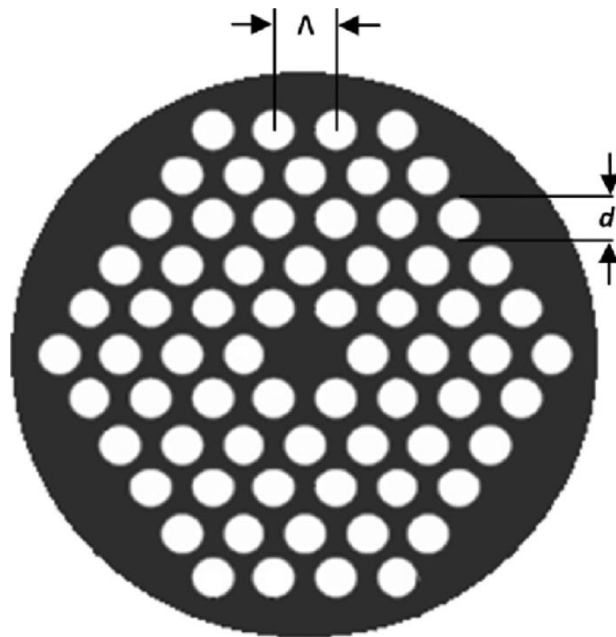


Рисунок 1.4 – Чорно-біла схема структури індекс-керуваного ФКВ з концентричними порами навколо центральної області

Загалом, фотонні кристалічні волокна пропонують широкий спектр технологічних переваг, включаючи гнучкість у виробництві, стійкість до впливу навколишнього середовища і контроль над поширенням хвиль і параметрами поляризації. Тому вони мають важливе значення для розвитку сучасної фотоніки, оптичної метрології, медичних приладів і високошвидкісних мереж передачі даних [3].

1.5 Застосування фотонно-кристалічних волокон

Завдяки своїм особливим властивостям, таким як здатність регулювати дисперсію, поляризацію, склад мод і спектр випромінювання, фотонні кристалічні волокна відкривають численні перспективи для застосування в сучасній оптиці та фотоніці. ФКВ найчастіше використовуються в телекомунікаційному секторі, де вони забезпечують високошвидкісну передачу даних на великі відстані з точним контролем дисперсійних характеристик і низькими втратами сигналу. Тому вони є перспективним

варіантом для розробки оптичних ліній зв'язку наступного покоління. Суперконтинуум, надширокий спектр випромінювання, що створюється при взаємодії ультракоротких імпульсів з нелінійним середовищем, можна ефективно генерувати в галузі нелінійної оптики завдяки ФКВ. Тому ФКВ часто застосовуються в метрології, частотно-часовому аналізі, оптичних вимірюваннях і спектроскопії. З них також виготовляють компактні джерела світла з широким спектральним діапазоном (рис. 1.5).

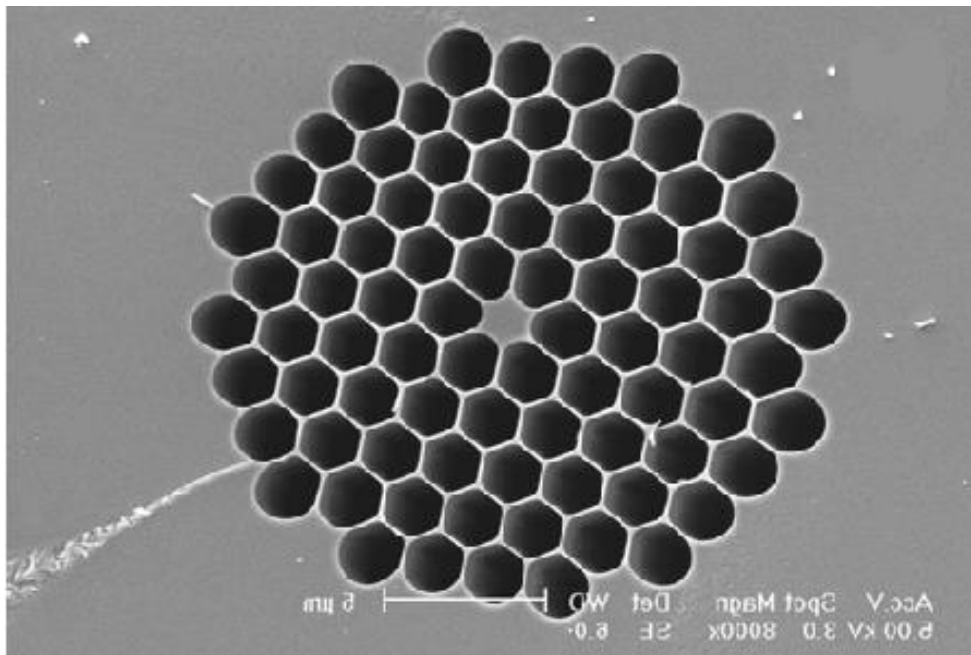


Рисунок 1.5 – Високоякісне SEM-зображення волокна з великою підтягнутістю отворів і точною геометрією

Фотокристалічні волокна використовуються в медичній діагностиці як основа для оптичних зондів та ендоскопічних систем, що забезпечують високу просторову роздільну здатність і мінімально інвазивне обстеження внутрішніх органів. ФКВ також використовуються в біосенсорах для виявлення біологічних молекул, температури, рН та інших фізичних і хімічних змін, оскільки вони можуть включати чутливі елементи в структуру волокна [4].

Завдяки своїй структурі, яка мінімізує нелінійні ефекти і дозволяє передавати високоінтенсивні імпульси без пошкодження волокна, фотонні кристалічні волокна використовуються в лазерних технологіях для транспортування потужного світла. Це має вирішальне значення для розробки потужних волоконних лазерів, хірургічних лазерних систем і високоточної обробки матеріалів. Моніторинг довкілля та зондування – це дві різні галузі. Завдяки своїй високій чутливості до змін зовнішніх умов, таких як тиск, температура, концентрація газу або рідини, ФКВ активно використовуються для створення високоточних вимірювальних приладів. Вони застосовуються в аерокосмічних системах, системах безпеки та охорони, а також у нафтогазовому секторі.

Таким чином, фотокристалічні волокна є гнучким інструментом для створення інтелектуальних оптичних систем, які поєднують в собі відмінну продуктивність з можливістю точного регулювання параметрів світлового сигналу. Завдяки постійному вдосконаленню технологій виробництва і зростаючим вимогам до оптичної функціональності в сучасному світі, їх використання тільки збільшується.

1.6 Виклики та перспективи розвитку фотонно-кристалічного волокна

Ряд технічних та інженерних перешкод не дозволяє фотонному кристалічному волокну широко використовуватися в комерційних технологіях, незважаючи на його чудові функціональні можливості. Складність і висока вартість виробництва є двома найбільшими перешкодами. Для створення регулярної мікроструктурованої оболонки з високою геометричною точністю потрібні складні технологічні процедури, такі як точне малювання преформ із заздалегідь сформованими капілярними структурами. Порівняно з традиційним оптичним волокном, це обмежує масове виробництво і підвищує вартість кінцевого продукту.

Вищі втрати в деяких типах ФКВ, особливо в порожнистих волокнах, становлять ще одну складність. Утримання і втрата світла можуть бути наслідком навіть невеликих структурних дефектів, варіацій діаметрів повітряних отворів або змін геометрії по довжині волокна. На кожному етапі виробництва необхідно розробити надзвичайно точні методи контролю якості, щоб гарантувати постійну якість. Підключення ФКВ до звичайних деталей, таких як активні елементи, модулятори або стандартні роз'єми, також має свої недоліки. Інтегрувати волоконно-оптичний кабель (ВОК) в існуючу інфраструктуру складно через несумісність геометричних і оптичних параметрів, що вимагає створення спеціалізованих адаптерів.

Незважаючи на ці перешкоди, перспективи створення ФКВ залишаються дуже позитивними. Вони дозволяють реалізувати надвисокошвидкісні канали з оптимізованими дисперсійними характеристиками в телекомунікаційному секторі, що особливо важливо для надширокосмугових систем. Порожністі ФКВ в лазерній техніці дозволяють транспортувати імпульси високої потужності без нелінійних ефектів, що є перевагою для високоточної обробки матеріалів, промислових лазерів і медичних застосувань [5].

Наразі проводяться дослідження, спрямовані на створення нового покоління надзвичайно чутливих сенсорів на основі ФКВ, які можуть ідентифікувати найдрібніші зміни біологічних агентів, температури, тиску чи хімічного складу. Водночас, нові матеріали (такі як композити або гібридні скелетні структури), нанотехнології та 3D-друк відкривають нові шляхи для зниження складності та вартості волоконної архітектури. У довгостроковій перспективі ФКВ можуть стати основою для інтегрованих фотонних систем, які об'єднують обробку сигналів, квантову інформацію, сенсори та оптичні комунікації на єдиній платформі. Фотонне кристалічне волокно розглядається як найважливіший компонент у створенні новітніх фотонних технологій завдяки своїй адаптивності в дизайні, широкому спектру застосувань і потенціалу для мініатюризації.

1.7 Решітки КагOME

Двовимірна періодична структура, яка називається решіткою КагOME, складається з вершин, з'єднаних у трикутники, які розташовані так, що між ними утворюються правильні шестикутники (рис. 1.6). Виразний геометричний візерунок утворюється завдяки розташуванню цих трикутників, що призводить до характерних шестикутних отворів між ними. Назва структури походить від традиційного японського орнаменту кагOME - симетричного та впорядкованого орнаменту, що використовується у решітковому плетінні та народному плетінні кошиків. Ця геометрія має візуально привабливу, але фізично складну конфігурацію завдяки своїй гексагональній симетрії або повторюваному гексагональному мотиву [6].

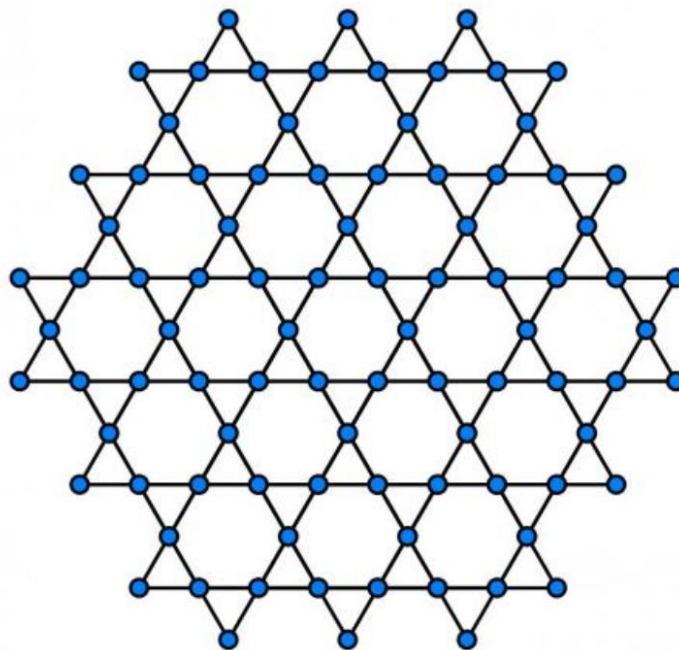


Рисунок 1.6 – Графічне зображення двовимірної решітки КагOME

1.8 Волоконні хвилеводи з решіткою КагOME

Чисельне моделювання волоконних фотонно-кристалічних хвилеводів з решіткою КагOME зазвичай проводиться чисельними методами. На рис. 1.7

представлена схема перетину такого хвилеводу з просторовим розподілом інтенсивності електричного поля. Лівий розподіл поля побудований у лінійному масштабі, правий розподіл – у логарифмічному.

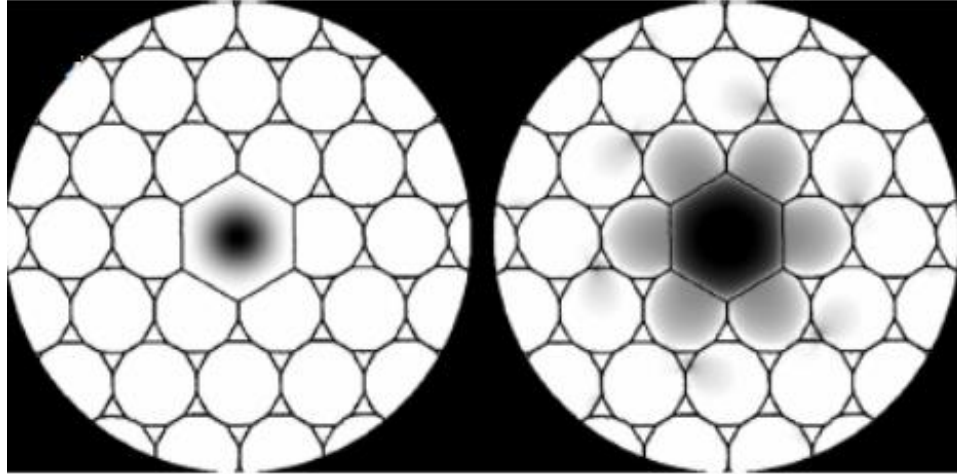


Рисунок 1.7 – Схема перетину фотонно-кристалічного волокна з решіткою Кагоме

Видно, що в цьому випадку реалізується ефективна локалізація енергії поля в межах пустотілого хвилеводного каналу. На рис. 1.8 представлені двовимірні розподіли поля для двох різних перетинів шестикутника, який обмежує серцевину хвилеводу. Інтенсивність поля представлена у децибелах. З рисунків видно досить суттєве зниження інтенсивності поля межах серцевини хвилеводу (аж до 40 дБ), що підтверджує висновок про доволі сильну локалізацію поля [7].

Слід відзначити, що представлений на рис. 1.7 розподіл поля відповідає основній моді фотонно-кристалічного волоконного хвилеводу. Для вищих мод ступінь локалізації енергії в серцевині може бути іншою.

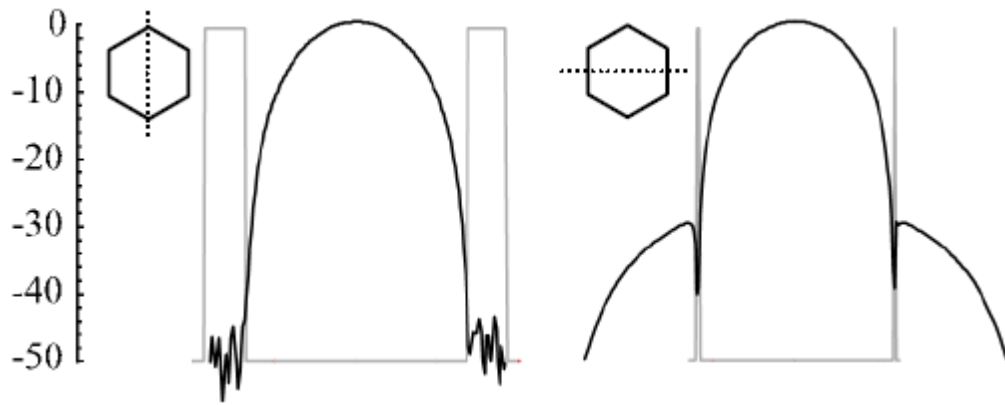


Рисунок 1.8 – Просторові розподіли поля у двох перетинах серцевини хвилеводу

Для аналізу хвилеводного механізму напев такій структурі необхідно розраховувати характеристики багатьох власних режимів оболонки хвилеводу, які показані на рис. 1.9.

Ідеальна решітка Кагоме не підтримує фотонні заборонені зони, і це залишається правдою навіть при невеликій деформації структури оболонки. Власні режими оболонки хвилеводу можна розділити на дві групи: «розпирні» режими та «повітряні» режими. Енергія розпирних режимів переважно концентрується в діелектричних частинах мікροструктури. Ці режими можуть бути ідентифіковані за більш крутими кривими дисперсії, які починаються при ефективних показниках заломлення $n_{\text{eff}} > 1$ [8].

Повітряні режими зосереджені в отворах, мають більш плоскі криві дисперсії та асимптоту до $n_{\text{eff}} = 1$ для коротких довжин хвиль. Імовірність того, що світло з режиму серцевини буде з'єднане з режимом оболонки, буде залежати від невідповідності констант поширення двох режимів $\Delta\beta = k\Delta n_{\text{eff}}$, просторового перекриття двох режимів та їх перекриття зі збуренням, яке викликає з'єднання. У випадку фотонних заборонених зон величина $\Delta\beta$ є достатньо великою у межах заборонених зон, щоб запобігти будь-якому з'єднанню між режимами серцевини та оболонки. У випадку решітки Кагоме

та відсутності фотонних заборонених зон інші фактори також повинні мати вплив.

Невідповідність констант поширення $\Delta\beta$ між режимами серцевини та оболонки фотонно-кристалічного волоконного хвилеводу можна якісно визначити з рис. 1.9. Тут синім кольором позначена мода серцевини хвилеводу, чорним кольором позначені численні моди оболонки хвилеводу. Повітряні режими утворюють найщільніші смуги, але знаходяться нижче і відокремлені від режиму серцевини по n_{eff} , як і слід було очікувати, враховуючи менший розмір отвору оболонки в порівнянні з серцевиною [9].

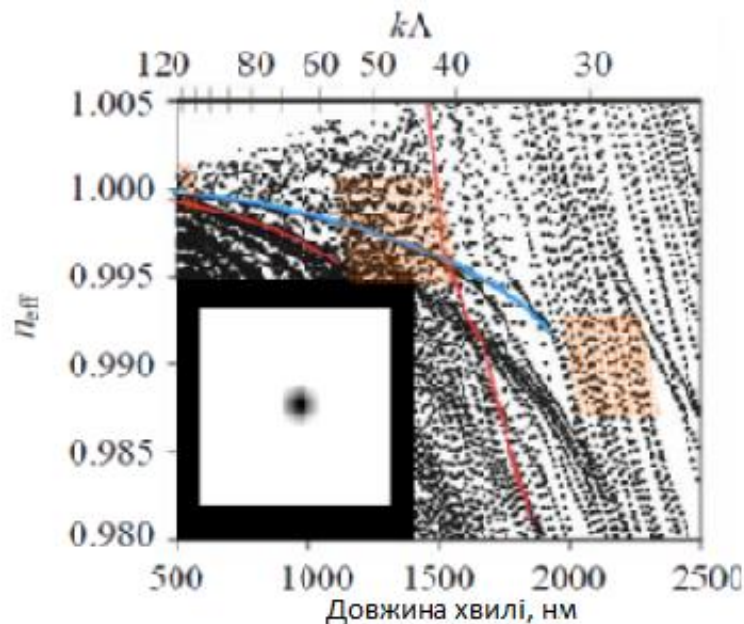


Рисунок 1.9 – Дисперсійна діаграма фотонно-кристалічного волоконного хвилеводу з решіткою Кагоме

Режими діелектричних перетинок часто перетинаються з режимом серцевини, однак вони не утворюють щільних перекриваючих смуг, розміщуючи режим серцевини в області відносно низької щільності режиму оболонки для деяких діапазонів довжин хвиль. Три області режиму діелектричних перетинок з високою щільністю можна ідентифікувати приблизно при $k\Lambda = 27\text{--}31$ нм, $45\text{--}60$ і $k\Lambda > 120$ нм, що відповідає високим

втратам для волокна, тоді як смуги з низькими втратами можна очікувати для діапазону $k\Lambda = 31\text{--}45$ нм, $60\text{--}120$ нм, де Λ – це період оболонки хвилеводу, тобто період структури КагOME. Більш високі значення $k\Lambda$ зазвичай не досліджуються чисельно за допомогою цього підходу, оскільки розрахунки стають надто трудомісткими [10].

Результати розрахунку просторових розподілів поля для кількох мод оболонки фотонно-кристалічного хвилеводу представлені на рис. 1.10.

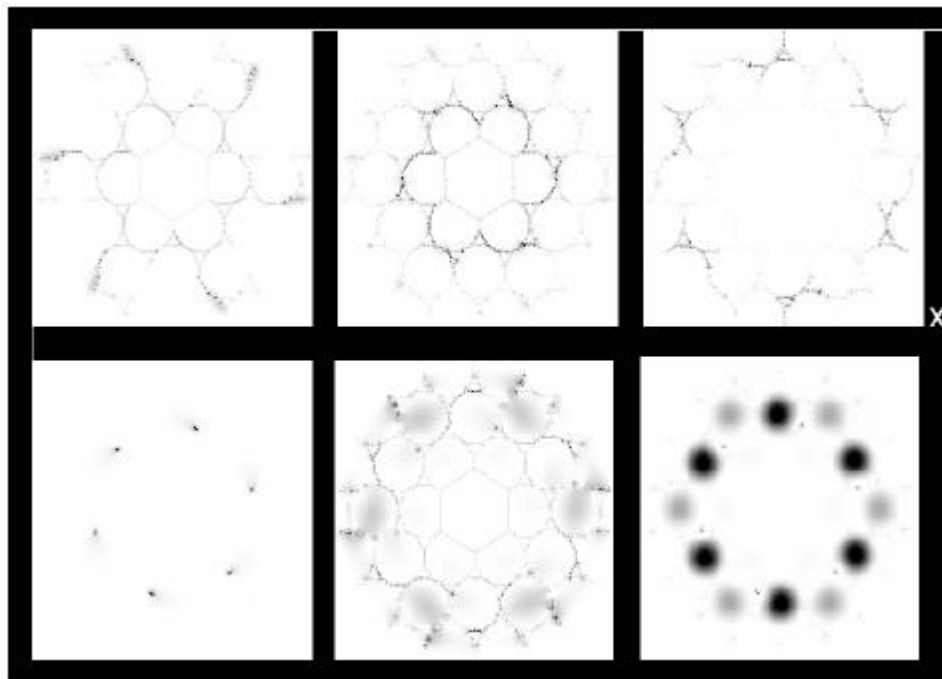


Рисунок 1.10 – Просторові розподіли мод оболонки волоконного фотонно-кристалічного хвилеводу

Кількісно, невідповідність $\Delta\beta$ між основним і найближчим режимами оболонки на кожній довжині хвилі в середньому становила 2700 м^{-1} в областях з низькою щільністю режимів і 1800 м^{-1} в областях з високою щільністю режимів, визначених вище, що дало різницю в 50 %.

Для оцінки невідповідності, необхідної для ефективного придушення зв'язку мод серцевини та оболонки, використовується приклад стандартного телекомунікаційного волокна SMF-28. Моделювання за допомогою методу ABC показало [11], що його основний режим відділений від першого режиму

високого порядку (витоку) приблизно на $\Delta\beta = 10\,000\text{ м}^{-1}$. Розгляд зв'язку в кремнієвому гексагональному НС-РСФ між режимами серцевини та поверхневими режимами, що підтримуються межею серцевини, показав подібне значення. Таким чином, значення $\Delta\beta$ тут не є достатньо великими, щоб повністю заборонити зв'язок, але вони дещо вплинуть на його ступінь. Слід зазначити, що в даному випадку розглядається середній ефект. Режими з $\Delta\beta$ нижче середнього викличуть більші втрати.

Наступним фактором, який слід враховувати, є перекриття режимів серцевини та оболонки. Режим серцевини фізично відокремлений від оболонки внаслідок його високої обмеженості. Шестикутна межа полімерного сердечника тонша, ніж розпірки в решті оболонки, а найвнутрішніші отвори менші, що означає, що режими, зосереджені найближче до режиму сердечника, не обов'язково будуть резонувати з рештою оболонки і матимуть нижчий ефективний показник заломлення. Режими, які найімовірніше будуть сполучатися з режимом серцевини (найменше $\Delta\beta$), – це режими ребер, які займають діелектричні частини мікроструктури [12].

Повітряні режими зазвичай далі відокремлені від режиму серцевини в постійній поширенні. Перекриття між режимами серцевини та ребер можна приблизно оцінити як перекриття між режимом серцевини та діелектричними частинами мікроструктури, і було виявлено, що для цього волокна воно має мінімальне значення 0,01 %; типовими були значення 0,025 % у діапазоні довжин хвиль, зазначеному на рис. 1.9. Це на порядок нижче, ніж конкретні приклади шестикутної решітки НС-РСФ, що згадуються в літературі, для яких було повідомлено про мінімальні значення від 0,12 % до 0,8 % [13] (відповідні значення для волокон з решіткою кагоме в літературі не повідомлялися).

Таким чином, проходження світла в серцевині фотонно-кристалічного хвилеводу з решіткою Кагоме можливе за відсутності фотонних заборонених зон оболонки завдяки зменшеній ймовірності зв'язку з режимами оболонки. Це є не тільки наслідком низької щільності режимів оболонки. Низьке перекриття між режимами серцевини та оболонки і зменшена чутливість до збурень, що в

кінцевому підсумку виникають через низьке перекриття полів мод, роблять ключовий внесок у пригнічення зв'язку.

1.9 Особливості полімерних оптичних волокон

Низьке перекриття основного режиму та режимів діелектричного матеріалу оболонки, що забезпечує проходження світла в цих фотонно-кристалічних волокнах, є особливо важливим для полімерних оптичних волокон, виготовлених з ПММА, які мають високий рівень поглинання в інфрачервоному діапазоні, як показано на рис. 1.11, що досягає 3000 дБ/м у вказаному діапазоні довжин хвиль [14].

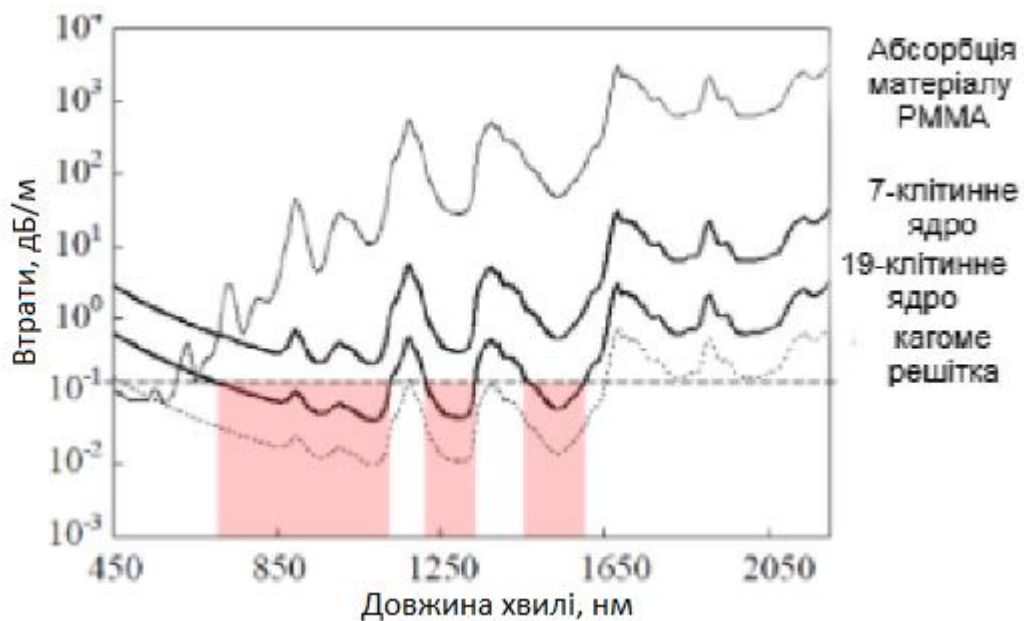


Рисунок 1.11 – Залежності втрат від довжини хвилі випромінювання для різноманітних структур з полімерного матеріалу

Отримані тут значення втрат 10 дБ/м є високими самі по собі, але демонструють максимальне 100-кратне зменшення втрат порівняно з поглинанням матеріалу. Передача з втратами нижче втрат матеріалу була досягнута тут для довжин хвиль від 1120 нм до 1680 нм (обмежених

діапазоном детектора в інфрачервоному діапазоні), і в спектрі втрат не було виявлено жодних особливостей, що відповідають пікам поглинання матеріалу. Вважається, що домінуючим механізмом втрат для виготовлених волокон є нерівності в поперечному перерізі волокна (тобто від одиничної комірки до одиничної комірки в оболонці), які підтримують режими, відмінні від решти оболонки, і збільшують втрати через резонансне з'єднання з серцевиною. Очікується, що такі проблеми будуть вирішені шляхом вдосконалення виготовлення.

Результати, показані на рис. 1.11, відповідають випадку ідеальної гексагональної решітки оболонки, для якої всі інші механізми втрат, крім поглинання матеріалом, є незначними. Серцевина хвилеводу утворюється шляхом пропуску 7 або 19 комірок періодичної оболонки, що призводить до приблизно 1 % і 0,1 % перекриття поля моди з діелектричним матеріалом, а отже, до зменшення ефективного поглинання матеріалу на два і три порядки [15].

Цей аналіз показує, що поглинання матеріалу все ще залишається домінуючим за межами видимого діапазону, тоді як розсіювання переважає на коротших хвилях. Перевага над поточними умовами експлуатації волокон РММА (при 650 нм із втратою 0,15 дБ/м) досягається лише у випадку зразка з більшим сердечником і дає три потенційні смуги передачі при довжинах хвиль: від 700 нм до 1130 нм, від 1230 нм до 1330 нм та від 1470 нм до 1600 нм, що збігається з телекомунікаційними довжинами хвиль. Втрати в цих діапазонах досягають мінімального рівня 0,05 дБ/м. Оскільки втрати матеріалу залишаються домінуючим механізмом, фотонно-кристалічні волокна з кагоме-решіткою можуть мати перевагу над конструкціями з гексагональною решіткою. Подальше потенційне зменшення втрат матеріалу можна досягти як за рахунок внутрішнього нижчого перекриття матеріалу та світла, так і за рахунок збільшення розміру серцевини без виникнення поверхневих мод. Оцінка втрат для такого волокна з перекриттям серцевинної моди та мод діелектричного матеріалу на рівні 0,025 % показана на рис. 1.11 і може потенційно відкрити набагато більшу прозорість для волокон ПММА. До

цього результату слід ставитися з обережністю, оскільки він передбачає, що втрати, спричинені зв'язком, можуть бути достатньо зменшені, що ще належить дослідити. Втрати, спричинені зв'язком, відрізняються від втрат обмеження, що спостерігаються в інших мікроструктурних або напівпровідникових волокнах, тим, що світло з'єднується з мікроструктурною оболонкою, тому цей механізм втрат не можна зменшити довільно, збільшивши товщину оболонки.

1.10 Плоскі енергетичні зони у решітці КагOME

Існування плоских енергетичних смуг у спектрі електронних або фотонних збуджень решітки КагOME є однією з найприкметніших і найхарактерніших її особливостей. Дисперсія в цих смугах майже відсутня, що зумовлено тим, що енергія частинок (електронів, фотонів чи інших квазічастинок) не залежить від їхнього імпульсу в певному діапазоні. На діаграмі розсіяння така зона зображується горизонтальною лінією, що вказує на те, що енергія повністю або майже повністю локалізована в просторі.

Деструктивна інтерференція хвильових функцій призводить до появи плоскої зони в решітці КагOME. Окремі хвильові компоненти взаємодіють у кристалічній структурі КагOME таким чином, що інтерференційні ефекти поглинають або гасять певні комбінації. Через це створюються локалізовані стани, де хвильові функції залишаються сконцентрованими в невеликій кількості вузлів, часто зосереджених навколо одного гексагону або трикутника, замість того, щоб поширюватися по решітці. Ця локалізація спричинена самою геометрією решітки, або інтерференційною геометричною локалізацією, а не дефектами чи неупорядкованістю, як у звичайних матеріалах. У фізиці сильно взаємодіючих систем плоскі зони мають вирішальне значення. Оскільки частинка не рухається, кінетична енергія відсутня, тому на перший план виходить взаємодія між частинками. Це може призвести до утворення нових колективних фаз. Наприклад, електрони в

плоскій зоні можуть створювати магнітні порядки, спонтанні поляризаційні стани, корельовану надпровідність або ферміонні кристали.

Спектроскопія з кутовою роздільною здатністю (ARPES) була використана для експериментального виявлення плоских зон у матеріалах зі структурою КагOME (наприклад, CoSn , Fe_3Sn_2 та AV_3Sb_5 , де $A = \text{K}, \text{Rb}$ та Cs). Наприклад, в AV_3Sb_5 були виявлені корельовані фази та аномальний ефект Холла, пов'язаний з частково заповненими плоскими зонами. Вважається, що такі матеріали є чудовими варіантами для дослідження нелінійного електронного транспорту і топологічної надпровідності. Локалізовані світлові режими на певних частотах спостерігаються у фотонних кристалах зі структурою КагOME, які мають подібні плоскі зони. Це дає змогу керувати груповою швидкістю світла, розробляти оптичні аналоги квантових рідин, створювати надщільні оптичні резонатори, розробляти фотонні сенсори.

Тому ключовим компонентом фізики решітки КагOME є плоскі енергетичні зони. Окрім розширення наших знань про природу локалізації хвиль, вони також створюють нові можливості для прикладної науки – від обчислювальних платформ наступного покоління до квантової електроніки та фотоніки [16].

1.11 Діракові конуси та топологічні властивості

Окрім плоских енергетичних зон, решітка КагOME має ще одну особливість, яка заслуговує на увагу: у її спектрі збудження присутні конуси Дірака. У зонній структурі, де розсіювання частинок описується лінійною дисперсією, де енергія частинки прямо пропорційна її імпульсу. Ці конуси є перетинами двох енергетичних зон. Електрони у добре відомому графені демонструють поведінку, подібну до поведінки безмасових ферміонів Дірака. Завдяки гексагональній симетрії та особливим умовам перетину зон у певних точках зони Бріллюена (зазвичай у K або M), подібні конуси з'являються і в структурі КагOME.

Зовнішні впливи, такі як спін-орбітальна взаємодія, порушення симетрії або магнітне впорядкування, можуть призвести до порушення симетрії, деформації або навіть розщеплення дірок у решітці КагOME. Сильна спін-орбітальна взаємодія призводить до відкриття щілини в забороненій зоні, переводячи матеріал у стан топологічного ізолятора (рис. 1.12). Це фаза, коли матеріал не проводить струм в об'ємі, а натомість демонструє захищені провідні стани на краях або поверхні, які є непроникними для дефектів і розсіювання.

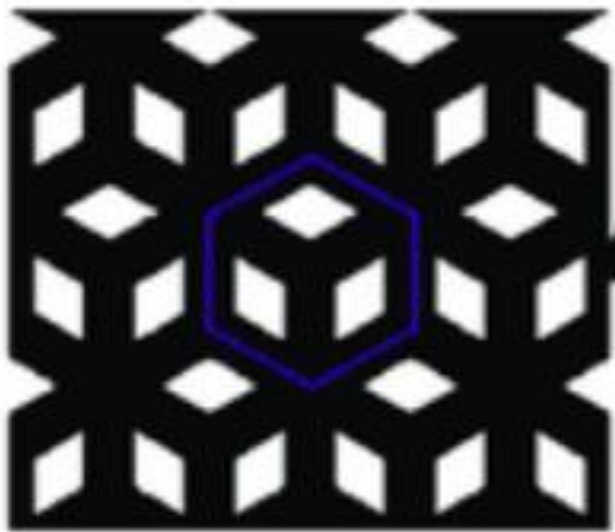


Рисунок 1.12 – Дизайн топологічного фотонного кристалу

Топологічні інваріанти, такі як Z_2 -індекс або число Черна, мають прямий зв'язок з цими крайовими модами. Такі моди можуть реалізувати квантовий ефект Холла в топологічних напівметалах, топологічних надпровідниках або матеріалах зі структурою кагOME без необхідності магнітного поля (аномальний ефект Холла).

До таких матеріалів належать, при кімнатній температурі магніт КагOME Fe_3Sn_2 демонструє незвичайний ефект Холла. Феромагнітний топологічний напівметал $Co_3Sn_2S_2$ демонструє помітне розсіювання Дірака. Надпровідники

на основі кагоме зі змішаними топологічними і корельованими фазами називаються AV_3Sb_5 (де $A = K, Rb$ і Cs).

Виникненню нових колективних ефектів, таких як хвилі густини заряду, щільності надпровідності, спонтанний магнітний порядок і навіть неоднорідні фази з порушеною часовою симетрією, сприяє часта присутність сингулярностей ван Гоува – точок у спектрі, де густина станів різко зростає, а також точок червоточини в решітках Кагоме.

Подібні явища також реалізуються у фотоніці: точки Дірака для світлових мод можуть бути відтворені фотонними кристалами з геометрією Кагоме, що призвело до розробки топологічних світловодів, оптичних діодів, невзаємних елементів і навіть топологічної лазерної генерації.

Отже, конуси Дірака в решітці Кагоме є реальною фізичною структурою, яка встановлює топологічну природу збуджень і має безліч застосувань у сучасній фотоніці, матеріалознавстві та квантовій фізиці. Це не просто математичний артефакт. Вони є однією з основних характеристик топологічної багатофазності решітки Кагоме, що робить її ідеальною платформою для квантових і наноелектронних технологій майбутнього [17].

1.12 Решітка Кагоме в фотоніці

Решітка Кагоме стала ключовою платформою у фотоніці як засіб регулювання нанорозмірного поширення світла. Її геометрія, що являє собою впорядковане повторення трикутників з гексагональними отворами, дозволяє створювати штучні фотонні середовища з унікальними спектральними характеристиками (рис. 1.13). Фотонні зони, локалізацію світла, дисперсійні криві і навіть топологічні властивості світлових мод можна проектувати і контролювати за допомогою таких структур.

Існування пласких фотонних смуг є одним з основних факторів, що зумовлюють інтерес до Кагоме-структур у фотоніці. Вони вказують на те, що групова швидкість світла в цих смугах майже дорівнює нулю, що свідчить про

те, що світло локалізоване, а не сильно поширюється. Це дозволяє розробляти чудові фотонні резонатори, мікролазери та компоненти затримки сигналу, які можуть утримувати світло протягом тривалого періоду часу в невеликому просторі.

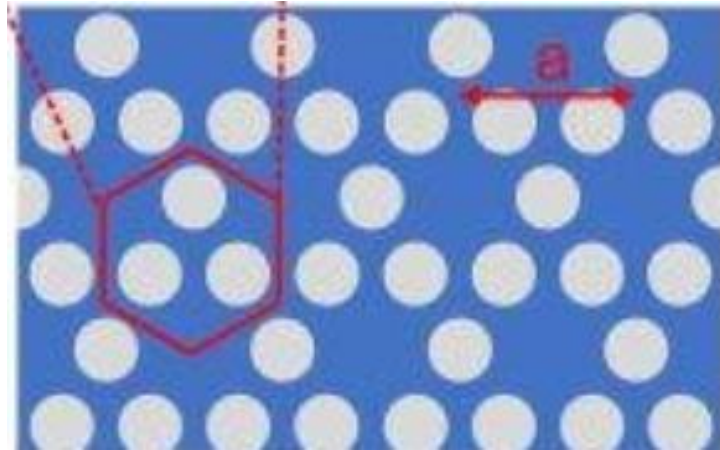


Рисунок 1.13 – Схема фотонного кристала на основі решітки КагOME з інверсією зон

Крім того, в КагOME-фотонних кристалах можна побачити фотонні конуси Діріхле, які нагадують електронні точки Дірака в графені або топологічних матеріалах. Ці точки забезпечують лінійні, безмасові збудження світла і їх можна побачити на дисперсійній діаграмі світлових мод. Ці конуси дозволяють проєктувати оптичні елементи з контрольованою дисперсією, топологічно захищеними модами, які не розсіюються на дефектах, і неповоротними світловодами [18].

Реалізація топологічних фотонних фаз є ще однією особливою характеристикою структур КагOME. У фотонному кристалі на основі решітки КагOME при штучному порушенні часової або просторової симетрії (наприклад, за допомогою обертальних полів, магнітооптичних ефектів або анізотропних матеріалів) виникають топологічно захищені світлові моди, які можуть поширюватися лише в одному напрямку і є стійкими до дефектів. Ці

структури слугують основою для розробки нелінійних фотонних пристроїв, топологічних лазерів і світловодів нового покоління.

Двовимірні фотонні метаматеріали, які можуть взаємодіяти з широким спектром електромагнітних хвиль, у тому числі у видимому, інфрачервоному та мікрохвильовому діапазонах, також використовують решітку КагOME. На відміну від природних матеріалів, ці структури можуть фокусувати хвилі, керувати поляризацією світла і створювати фотонні заборонені зони, використовуючи від'ємний показник заломлення.

КагOME структури широко використовуються в багатьох галузях сучасної фотоніки в реальних застосуваннях. Вони є основою для розробки високочутливих оптичних сенсорів, які можуть ідентифікувати навіть найменші зміни в навколишньому середовищі завдяки сильній локалізації електромагнітного поля. Створення керованих джерел світла і компактних високоефективних мікролазерів стало можливим завдяки формуванню оптичних мод у пласких областях. Реалізація оптичних логічних елементів та обчислювальних схем, які можуть забезпечити неповторну, безпечну передачу сигналів, базується на фотонних топологічних ізоляторах, інтегрованих у кагOME-структури. Крім того, в телекомунікаційних системах, де стабільність сигналу має вирішальне значення, світловоди з нульовою дисперсією на основі цих структур стають необхідними. КагOME-фотонні кристали використовуються в біофотоніці для спектроскопії та високоточного зондування біологічних середовищ, що робить їх перспективними для біосенсорики та медичної діагностики наступного покоління.

У фотоніці решітка КагOME є дуже перспективною архітектурою, яка дозволяє реалізувати базові та прикладні оптичні ефекти, неможливі з традиційними матеріалами. Завдяки своїм особливим геометричним і топологічним характеристикам вона відкриває нові можливості в галузі світлотехніки, від квантової оптики до телекомунікацій і сенсорів [19].

1.13 Перспективи досліджень

Численні можливості для подальших досліджень у фізиці конденсованого стану, топологічних матеріалах, квантовій оптиці та фотоніці відкрила решітка кагоме, яка продовжує залишатися в центрі уваги сучасної фундаментальної та прикладної науки. Ці структури забезпечують дуже універсальну платформу для дослідження нових квантових фаз і явищ завдяки їхній складній поведінці, яка є результатом взаємодії між геометричною фрустрацією, плоскими зонами, конусами Дірака і топологічними ефектами.

Вивчення сильно корельованих станів речовини, зокрема спінових рідин, спонтанно порушених симетрій, зарядових або спінових щілин і незвичайних типів надпровідності, є однією з найцікавіших галузей. Виникненню таких екзотичних фаз сприяє той факт, що взаємодія між частинками може домінувати в кінетиці кагомних систем завдяки наявності плоских енергетичних зон.

Вивченню топологічних фаз, зокрема напівметалів Вейля, топологічних ізоляторів, надпровідників зі змішаною симетрією та матеріалів, які можуть демонструвати топологічний фазовий перехід під впливом зовнішніх магнітних полів, тиску або температури, приділяється особлива увага. У зв'язку з цим метали кагоме, такі як AV_3Sb_5 , відкрили новий шлях: топологічно корельовані матеріали, в яких електронна взаємодія і топологія підсилюють один одного.

Водночас фотонні та метаматеріальні аналоги структур Кагоме набувають все більшої популярності, оскільки дозволяють відтворювати електронні ефекти в системах, що використовують плазмони, мікрохвилі або світло. Це уможлиблює розробку нових оптичних пристроїв, таких як топологічно захищені лазери, надщільні резонатори, оптичні діоди тощо, а також перевірку квантових теорій у синтетичних умовах.

Прикладні аспекти не менш важливі. Датчики наступного покоління, квантові обчислювальні платформи, енергоефективні електронні компоненти

та телекомунікаційні компоненти, що поєднують високу продуктивність і низькі втрати, можуть бути побудовані з використанням структур кагоме.

У майбутньому Кагоме-матеріали також можуть бути інтегровані в одношарові або двошарові гетероструктури, що дозволить контролювати квантові властивості аж до рівня атома. Ці методи можуть слугувати основою для розробки квантових симуляторів і дослідження ефектів, які важко побачити у звичайних матеріалах.

Загалом, дослідження решітки Кагоме лежить на перетині інженерії, топології, матеріалознавства та квантової фізики [20].

2 МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНОГО ВОЛОКНА З РЕШІТКОЮ КАГОМЕ

2.1 Побудова моделі в пакеті COMSOL

Робота була виконана за допомогою пакета Comsol Multiphysics, а саме інструменту Model Wizard (рис. 2.1). За допомогою цього практичного та ефективного інструменту користувачі можуть швидко та ефективно створювати моделі. Він супроводжує користувача на основних етапах моделювання, включаючи створення сітки, встановлення граничних умов, призначення матеріалів, побудову геометрії та вибір фізичного інтерфейсу.

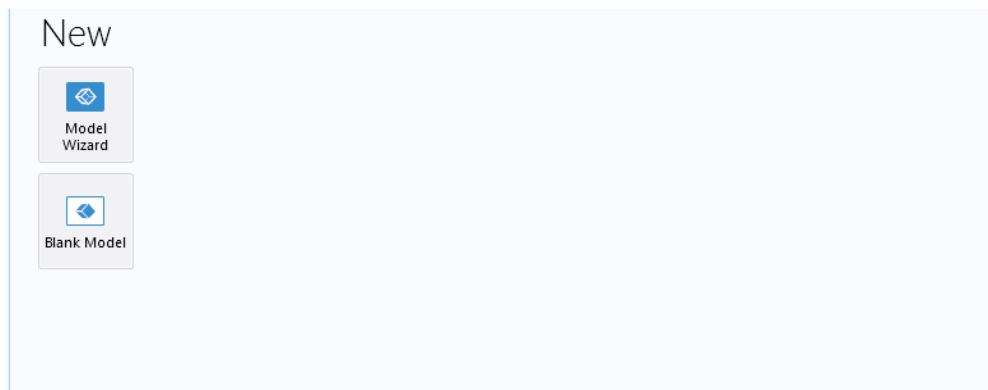


Рисунок 2.1 – Вікно вибору алгоритму побудови моделі

Це двовимірна (2D) модель. У ситуаціях, коли третій вимір не є вирішальним, двовимірний підхід забезпечує достатню точність результатів, одночасно оптимізуючи процес обчислення та знижуючи вимоги до обчислювальних ресурсів. Проблеми теплопередачі, гідродинаміки, електромагнітних полів та механіки конструкцій – це лише деякі з фізичних процесів, які зазвичай вивчаються в середовищі Comsol Multiphysics за допомогою двовимірних моделей.

У цій роботі використовується інтерфейс «Electromagnetic Waves, Frequency Domain» (рис. 2.2) модуля «Wave Optics». Цей інтерфейс був створений спеціально для дослідження того, як електромагнітні хвилі

поширюються в різних середовищах, та для аналізу їх поведінки при зміні частоти.

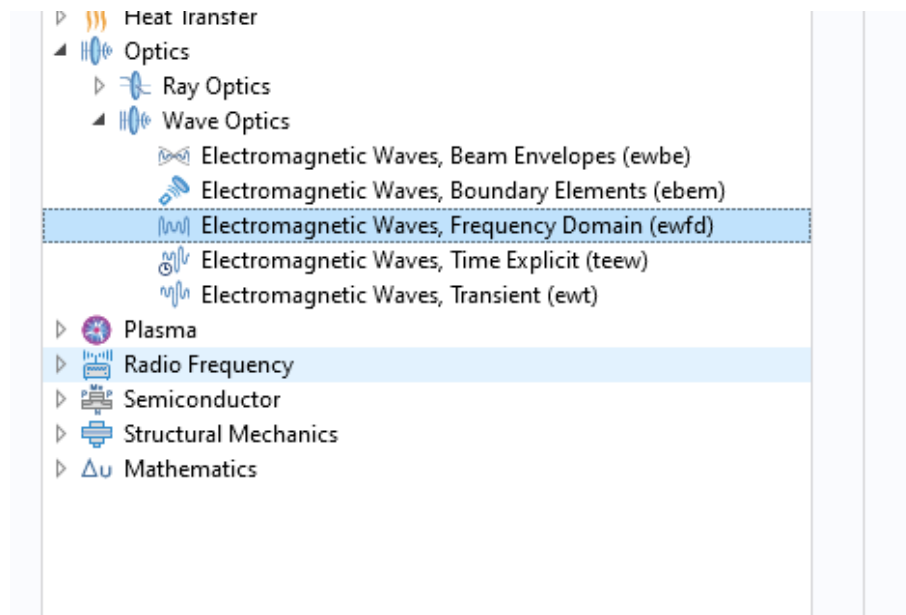


Рисунок 2.2 – Вікно з вибором модулів

Крім того, в роботі використовується модуль розрахунку (розв'язувач) для аналізу власних мод конструкції – Mode Analysis (рис. 2.3). У певній конфігурації його можна використовувати для визначення власних мод електромагнітного поля. Такий розрахунок дозволяє знайти моди, які можуть існувати в конструкції за певних граничних умов і параметрів матеріалу, а також відповідні частоти і розподіл поля.



Рисунок 2.3 – Вікно для обрання розрахункового модуля для визначення власних режимів структури

Спочатку розглянемо найпростіший варіант фотонно-кристалічного волокна, який можна ідентифікувати як мікструктурований хвилевід (рис. 2.4). В цьому випадку серцевина волокна оточена шістьма пустотілими отворами циліндричної форми з радіусом кілець 0,7 мкм.

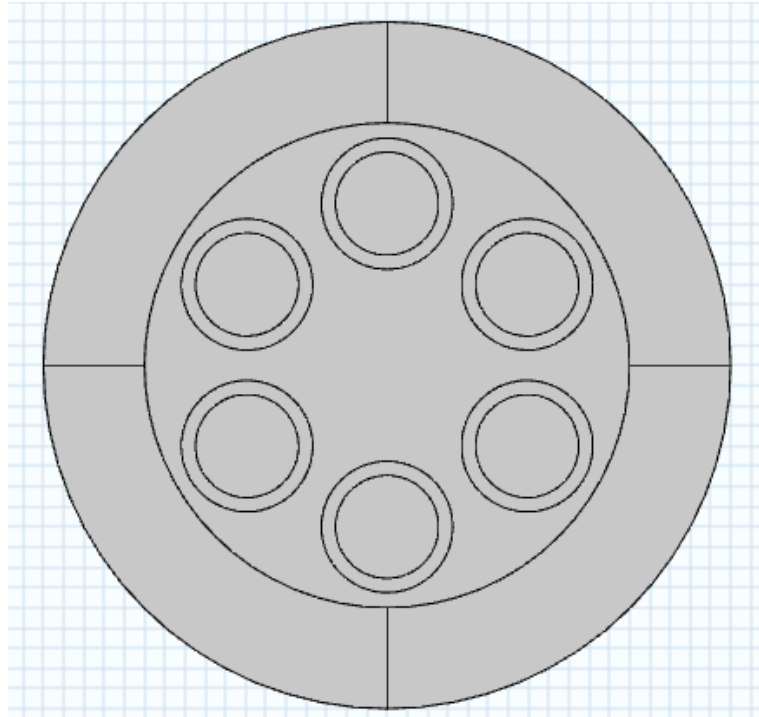


Рисунок 2.4 – Фотонно-кристалічне волокно з шістьма циліндрами, які формують оболонку

Серцевина хвилеводу є пустотілою. Оскільки такі хвилеводи можуть ефективно утримувати та контролювати світло у складних конфігураціях, вони використовуються в мікструктурованих оптичних волокнах. Важливим компонентом сучасних телекомунікаційних та оптичних систем є оптичні волокна з високою пропускнуою здатністю та низькими втратами, які можна виробляти завдяки внутрішній мікструктурі та спеціальним характеристикам силіконового хвилеводу. Повітря заповнює порожнини структури, знижуючи ефективний індекс оболонки хвилеводу та мінімізуючи втрати при згинанні волокна.

Для правильного обчислення власних мод необхідно задати відповідні граничні умови, оскільки волоконний фотонний кристал з є типом відкритого діелектричного хвилеводу. У цьому випадку найбільш підходящими є граничні умови поглинання у вигляді поглинаючих шарів PML. Точні результати моделювання стають можливими завдяки точно вирівняним шарам у структурі волокна, які зменшують небажані відбиття електромагнітної енергії від меж обчислювальної області.

Наступним етапом процесу побудови моделі є визначення завдань для власних режимів системи. Цей процес в основному здійснюється в розділах «Electromagnetic Waves», «Frequency Domain» та «Study». У цьому випадку вибирається опція «Three component vector», яка враховує всі компоненти електромагнітного поля, що дозволяє розглянути велику кількість потенційних режимів роботи оптичного волокна. Для чисельного аналізу використовується вирішувач «Mode Analysis», який за замовчуванням включений в розділ «Study».

Метод скінченних елементів використовується для моделювання фізичних процесів у середовищі COMSOL Multiphysics. Створення розрахункової сітки, яка розділяє геометрію моделі на дрібні компоненти та дозволяє чисельно розв'язувати рівняння електромагнітного поля, є важливою складовою цієї методології. У вузлах сітки обчислюються всі необхідні параметри системи.

Слід зазначити, що на точність результатів моделювання безпосередньо впливає якість сітки. З цієї причини часто використовується автоматичне створення сітки з можливістю вибору з різних рівнів її щільності. Найкращий рівень деталізації для досягнення необхідної точності можна визначити, порівнявши результати для різних варіантів дискретизації. Як показано на рис. 2.5, області з найвищою кривизною поверхні, що розділяють середовища з різними властивостями матеріалу, також мають найвищу концентрацію елементів сітки. Особливо це наочно видно в областях стінок діелектричних трубчастих циліндрів.

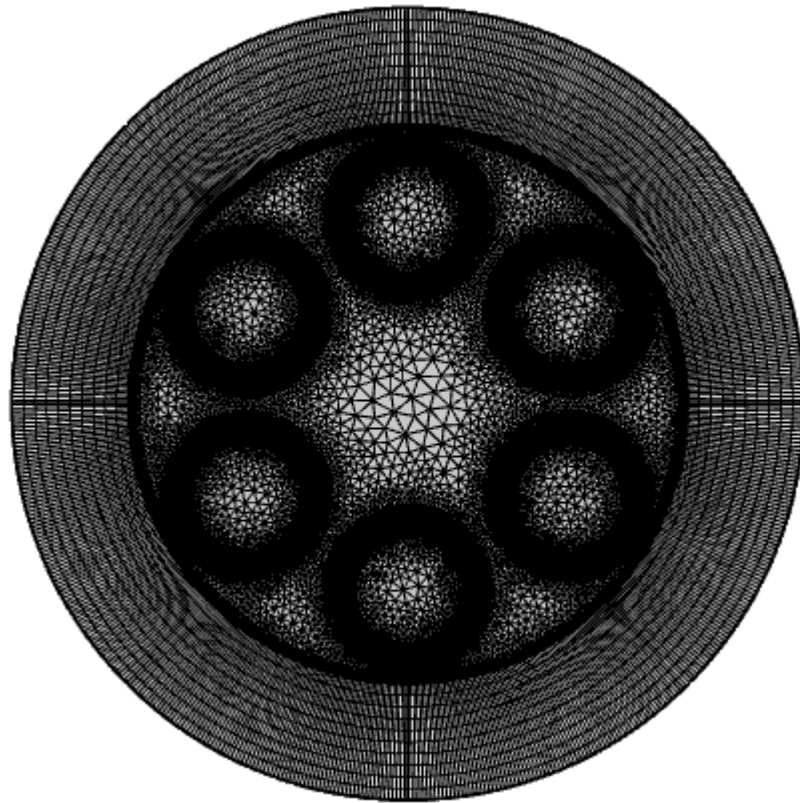


Рисунок 2.5 – Зображення розрахункової сітки

Слід зазначити, що при автоматичній побудові сітки реалізуються різні її конфігурації для області перетину волоконного хвилеводу і для області поглинаючого шару. В цьому випадку суттєво скорочується час чисельних розрахунків.

Далі розглянемо побудову більш складної моделі фотонно-кристалічного волокна (рис. 2.6). В цій конструкції додається шість діелектричних трубчастих циліндрів до періодичної оболонки серцевини волоконного хвилеводу.

Товщина оболонки серцевини хвилеводу з порожнистими отворами і радіусом кільця 0,7 мкм, була збільшена для побудови моделі цього варіанту хвилеводу. Це дозволяє більш точно моделювати поширення електромагнітних хвиль в структурі і враховує вплив додаткових отворів на власні моди волокна.

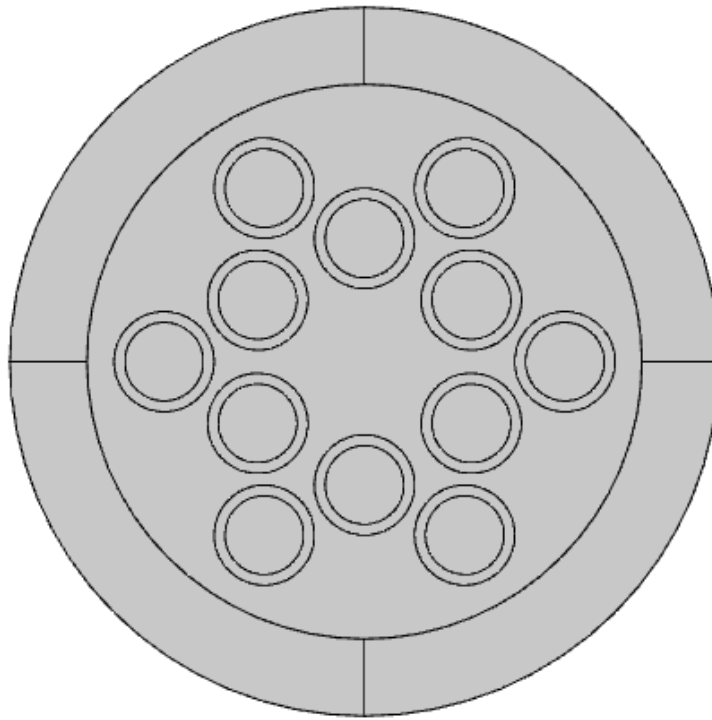


Рисунок 2.6 – Фотонно-кристалічне волокно з дванадцятьма циліндрами

У цій моделі також використовується поглинаючий шар, що оточує досліджувану структуру фотонного кристала. Параметри цього шару не змінюються порівняно з попередньою структурою.

Для створення обчислювальної сітки використовується той самий процес, що і для найпростішої конфігурації волокна. Однак збільшення діаметра області моделювання призводить до значного збільшення кількості вузлів сітки, що збільшує час чисельних розрахунків. На рис. 2.7 показано результат побудови сітки для цієї моделі. В цьому випадку також спостерігається згущення сітки в областях діелектричних трубчастих циліндрів, що необхідно для підтримування необхідного рівня точності отримуваних результатів.

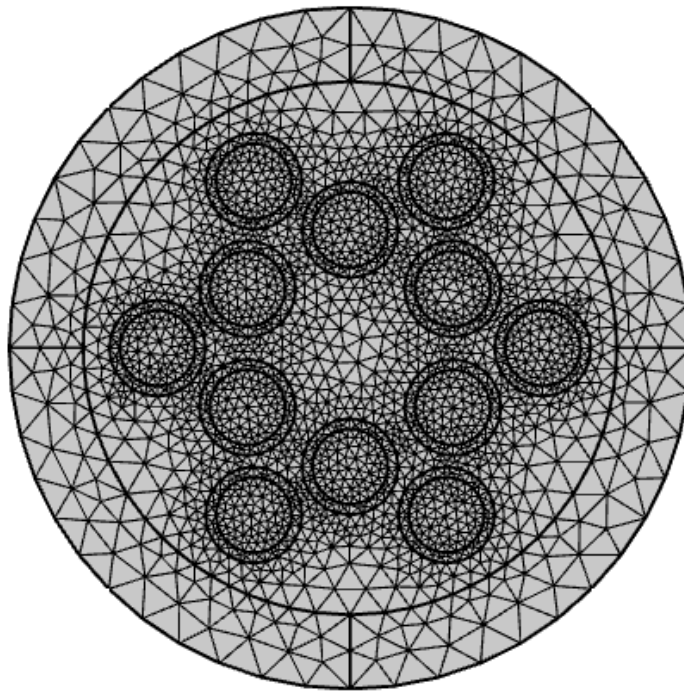


Рисунок 2.7 – Результат побудови розрахункової сітки для ускладненого варіанту конфігурації хвилеводу

Структура, зображена на рис. 2.8, створюється при подальшому збільшенні кількості трубчастих діелектричних циліндрів у волоконному хвилеводі. Таке розташування створює добре відому архітектуру хвилеводу, в якій оболонка діелектричного каналу хвилеводу складається з отворів, розташованих періодично для регулювання поширення світлових хвиль всередині серцевини. Більше того, така структура вже може розглядатися як певний варіант фотонно-кристалічного волокна з решіткою кагоме, оскільки вона подібна до відомих з літератури (рис. 2.9).

Таким чином, в роботі розглядається кілька варіантів мікроструктурованих волоконних хвилеводів, які в результаті поступового ускладнення структури оболонки переходять до структури хвилеводу з решіткою кагоме. Такий підхід дозволяє порівнювати власні режими різних схем волоконних хвилеводів та визначати їх фізичні особливості.

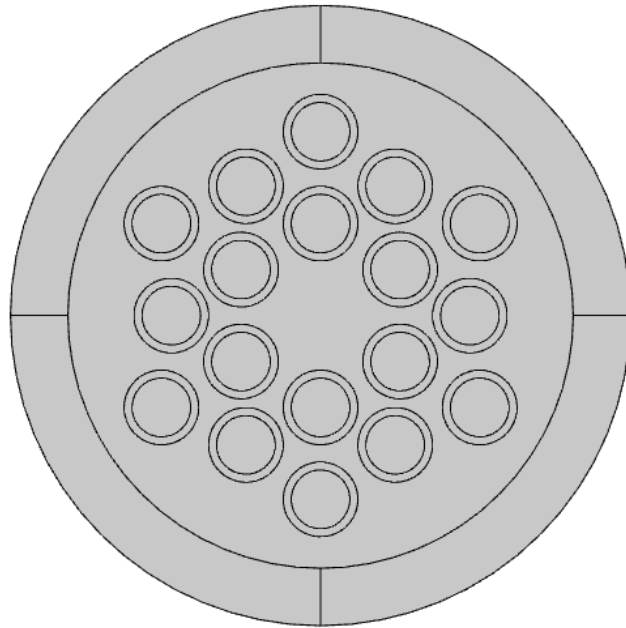


Рисунок 2.8 – Фотонно-кристалічне волокно, оболонка якого формується з вісімнадцяти циліндрів

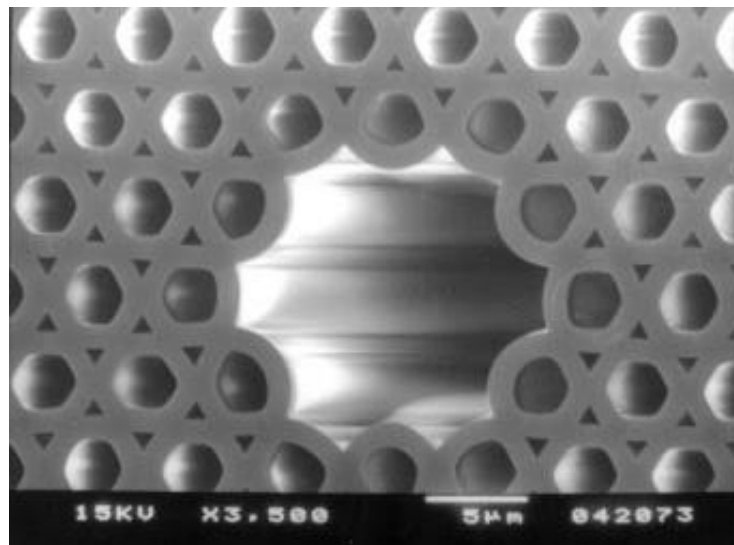


Рисунок 2.9 – Мікрофотографія перетину волоконного хвилеводу з решіткою Кагоме

На рис. 2.10 показано результат автоматичної побудови розрахункової сітки. На відміну від попередніх варіантів волоконних хвилеводів, в даному

випадку спостерігається формування окремої області оболонки хвилеводу, для якої щільність розрахункової сітки вища порівняно із пустотілою серцевиною. Це дозволяє обчислювати характеристики власних режимів оболонки хвилеводу з більш високою точністю, що є суттєвим саме для хвилеводів з решіткою кагоме, де механізм локалізації енергії в серцевині структури пояснюється через пригнічення електромагнітного зв'язку між модами серцевини та модами оболонки.

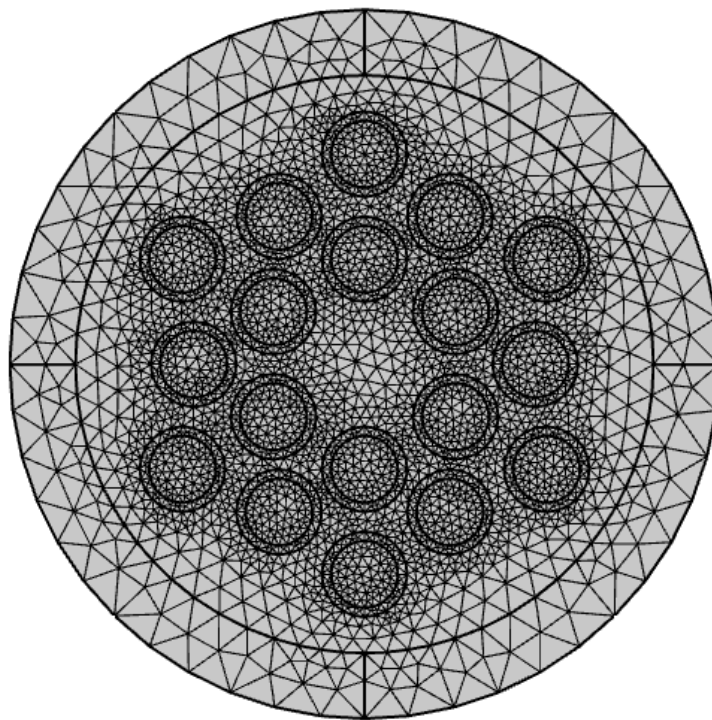


Рисунок 2.10 – Результат побудови розрахункової сітки волоконного хвилеводу

2.2 Аналіз результатів розрахунків

Характеристики власних режимів цієї лінії передачі були розраховані за допомогою створеної мікроструктурної моделі волокна. Основна увага приділяється чисельному аналізу просторового розподілу електромагнітного поля

в поперечному перерізі волокна. Аналізуючи результати, ми можемо оцінити ефективність локалізації електромагнітної енергії в серцевині волокна.

На рис. 2.4 була показана схема базової конфігурації мікроструктурного волокна, яка розглядається в першу чергу. У цьому варіанті шість діелектричних циліндрів з пустотілою серцевиною розміщені у вершинах правильного багатокутника, в середині якого знаходиться серцевина хвилеводу. Термін «мікроструктурне волокно» є більш точним і загальним, оскільки така структура, як правило, не може бути віднесена до категорії фотонно- кристалічних волокон.

Результати визначення просторового розподілу електричного поля в поперечному перерізі хвилеводу для одної з мод показані на рис. 2.11.

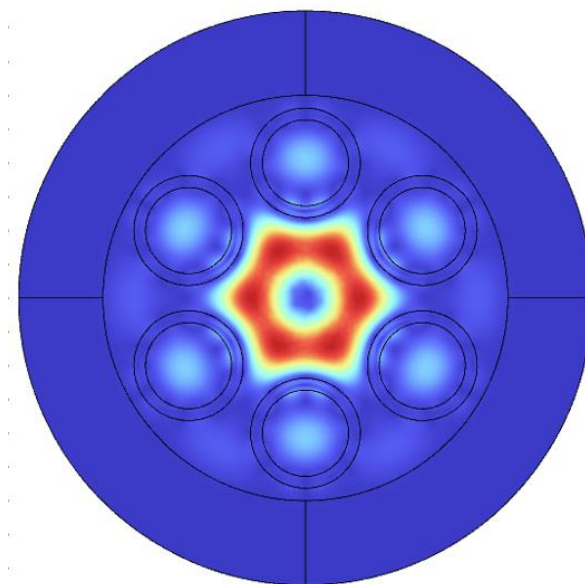


Рисунок 2.11 – Просторовий розподіл електричного поля у структурі з шістьма елементами

Отриманий розподіл описує власний режим структури, який є одним з можливих режимів. Ефективний показник заломлення в даному випадку становить 0,9871.

Поперечна довжина хвилі збільшується із зростанням ефективного показника заломлення, зменшуючи кількість електромагнітної енергії, яка проходить повз серцевину хвилеводу. Результати обчислення просторового розподілу поля моди з ефективним показником 0,9927 (рис. 2.12) підтверджують це. У цьому випадку електромагнітна енергія більш ефективно локалізується в серцевині мікροструктурного волокна, що демонструє порівняння рис. 2.11 та рис. 2.12.

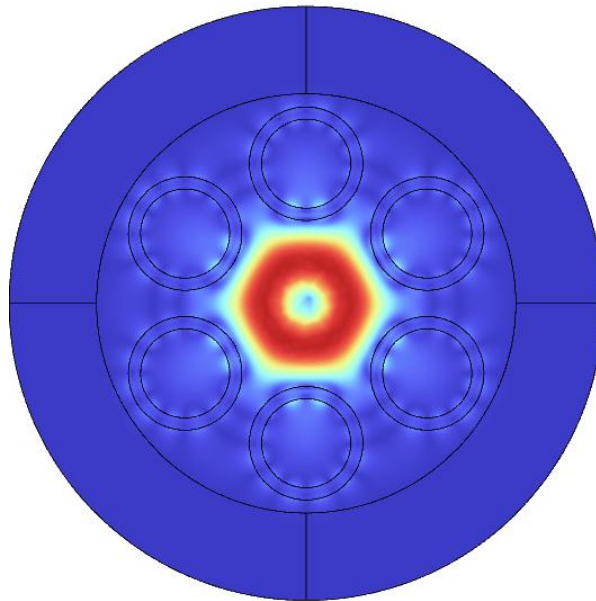
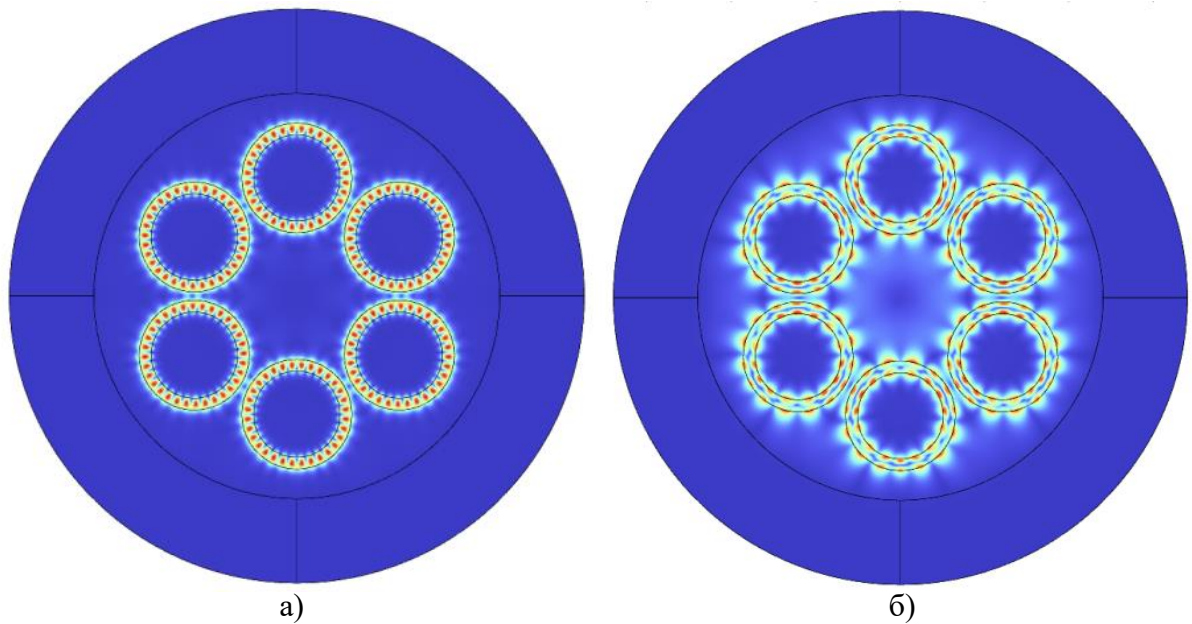


Рисунок 2.12 – Просторовий розподіл поля для значення ефективного індексу моди 0,9927

На рис. 2.13 представлено результати розрахунку просторового розподілу поля для моди з іншою структурою. В цьому випадку поле в серцевині хвилеводу практично відсутнє. Енергія зосереджена в діелектричних стінках пустотілих циліндрів, які формують оболонку хвилеводу.



- а) $n_{eff} = 0,981$;
 б) $n_{eff} = 0,994 - i1,8 \times 10^{-5}$.

Рисунок 2.13 – Просторові розподіли поля для мод оболонки хвилеводу

На рисунку показані два випадки розподілу поля, які відповідають різним значенням власних частот. Крім того, розподіл поля на рис. 2.13, б відповідає комплексній власній частоті. Уявна частина цієї частоти характеризує втрати в системі. Оскільки в даному випадку енергія поля зосереджена в діелектричних стінках трубчастих циліндрів, то такі моди можна охарактеризувати як моди оболонки пустотілого хвилеводного каналу. Видно, що ці моди характеризуються досить високочастотними осциляціями поля подібно до того, як це відбувається в фотонно-кристалічних волоконних хвилеводах з решіткою кагоме.

Отже, в розглянутій конфігурації мікроструктурного хвилеводу спостерігаються кілька варіантів власних режимів, які характеризуються різними розподілами інтенсивності поля в серцевині та оболонці хвилеводу. Звертає на себе увагу той факт, що найбільше значення ефективного індексу реалізується для випадку, коли енергія поля розподіляється між серцевиною

хвилеводу і оболонкою, причому поле оболонки характеризується високочастотними осциляціями на відміну від поля серцевини.

Далі розглянемо характеристики мікроструктурного волоконного хвилеводу з модифікованою оболонкою. На рис. 2.6 було показано його схему. Як видно, у цій конструкції в два рази більше трубчастих діелектричних циліндрів. Результати розрахунків дозволяють визначити, як ця зміна конфігурації поперечного перерізу впливає на основні властивості хвилеводу.

Результати розрахунку просторового розподілу електричного поля для мод модифікованого хвилеводу з різними значеннями ефективного показника заломлення показані на рис. 2.14.

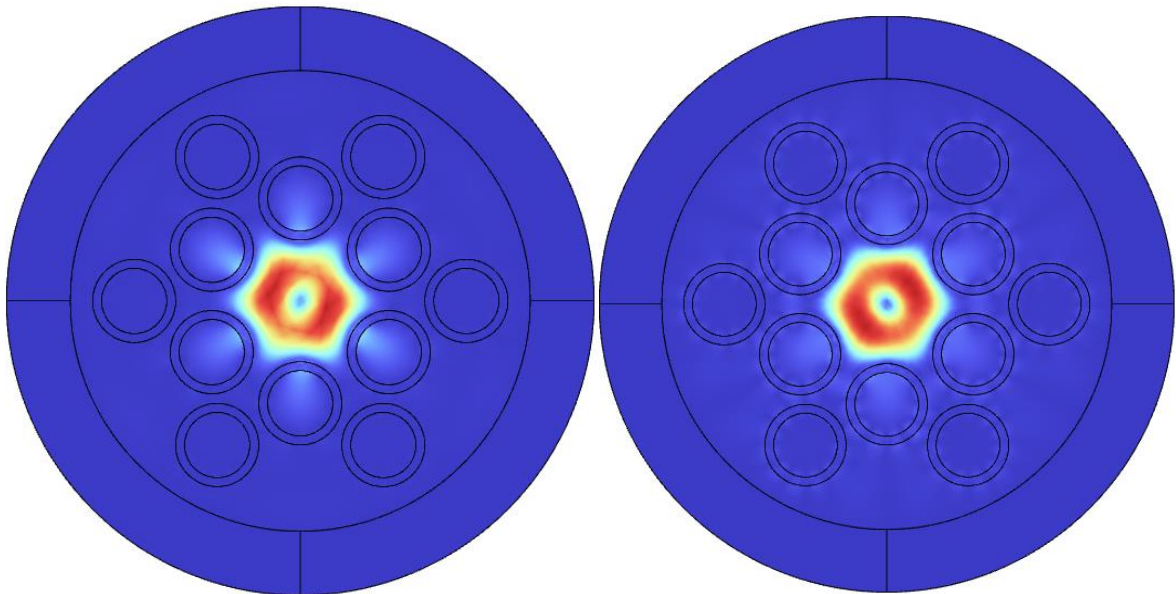
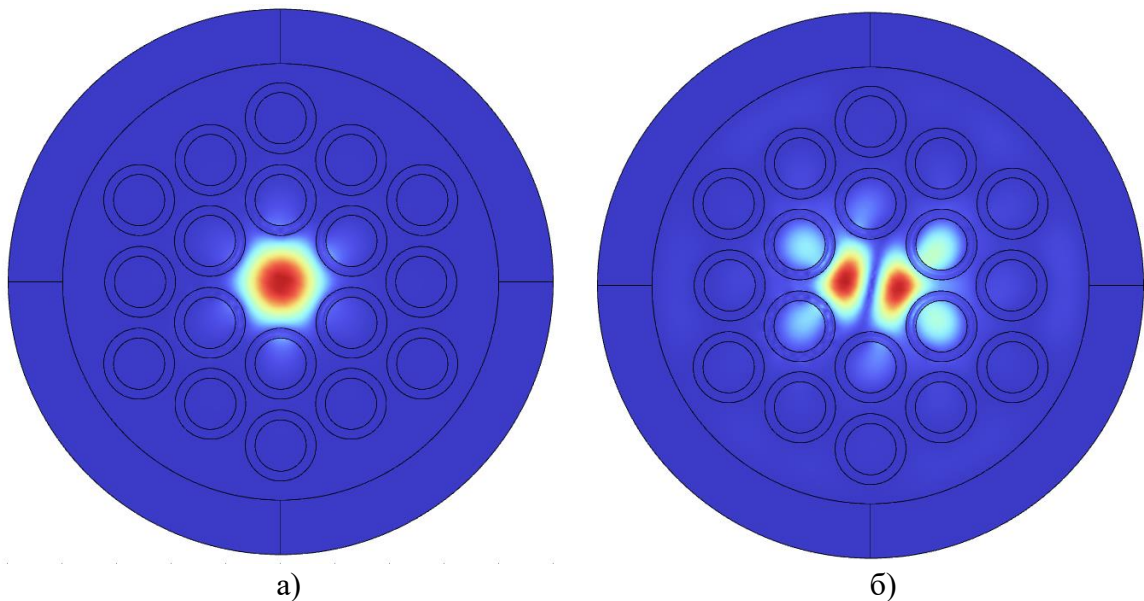


Рисунок 2.14 – Просторові розподіли поля для різних значень ефективного індексу моди

На рисунках показано просторовий розподіл електричного поля для різних значень ефективного індексу моди. Фізичні закономірності впливу індексу моди на просторову структуру поля, згідно з порівнянням результатів з даними попереднього випадку, практично не змінилися. В результаті, розглянута модифікація поперечного перерізу волоконного хвилеводу має

майже ідентичні властивості з попередньою конфігурацією. Слід відзначити певні відмінності між просторовими розподілами поля на рис. 2.14. На рисунку справа спостерігаються певні осциляції поля в діелектричних стінках пустотілих циліндрів. Це означає, що і для цієї конфігурації хвилеводу відбувається формування мод оболонки хвилеводу. Саме закономірності взаємодії цих мод з модами серцевини хвилеводу визначають ефективність локалізації енергії поля в хвилеводному каналі. Схожа ситуація спостерігається і для найпростішої конфігурації хвилеводу (рис. 2.11 та рис. 2.12).

Тепер розглянемо мікроструктурне оптичне волокно з утричі більшою кількістю трубчастих діелектричних елементів. Дослідимо вплив цієї зміни на властивості мікроструктурного хвилеводу. Результати розрахунків просторового розподілу електричного поля для двох мод цієї модифікації волоконного хвилеводу показані на рис. 2.15.



а) $n_{eff} = 0,9969$; б) $n_{eff} = 0,9927$.

Рисунок 2.15 – Просторові розподіли полів мод у перетині хвилеводу

На цьому рисунку представлені результати розрахунків для товщини стінок трубчастих діелектричних елементів 0,9 мкм. Крім того, з рисунку

видно, що між цими елементами є певна відстань. Отримані просторові розподіли поля відповідають основній та першій вищій модам. Це видно з кількості варіацій поля в серцевині волоконного хвилеводу. Ці моди характеризуються доволі значними ефективними індексами, що свідчить про ефективну локалізацію поля в пустотілому каналі і, відповідно, про невеликі втрати при розповсюдженні сигналів.

Слід підкреслити, що в даному випадку практично відсутнє поле в оболонці хвилеводу, що суттєво відрізняє таку конфігурацію від розглянутих раніше.

Розглянемо далі результати моделювання волоконного хвилеводу для випадку, коли товщина стінок трубчастих елементів структури дорівнює 0,1 мкм. В цьому випадку є лише одна мода, енергія якої локалізована в пустотілому каналі хвилевода (рис. 2.16). Ефективний індекс цієї моди складає 0,9959.

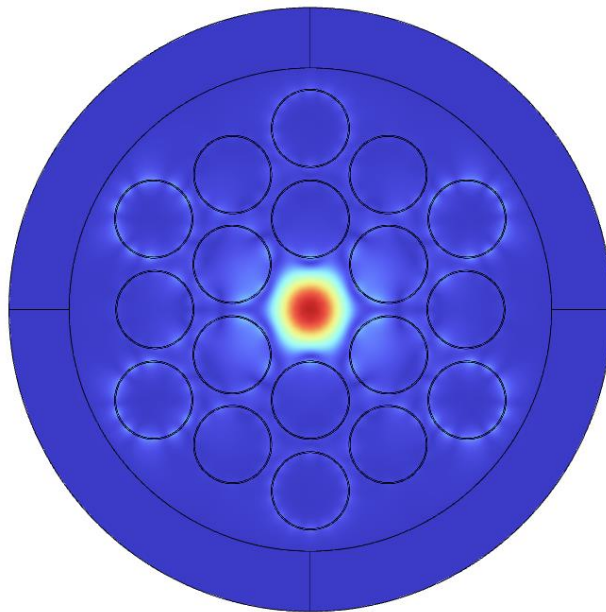


Рисунок 2.16 – Просторовий розподіл поля локалізованої моди у перетині хвилеводу

З рисунку видно, що в цьому випадку поле моди існує не лише в серцевині хвильоводу, а й у його оболонці. Але мода оболонки не охоплює всі її елементи, що відрізняє таку структуру від попередньо розглянутих. Тобто власні режими хвильоводу з оболонкою, яка подібна до структури кагоме, характеризуються певним електромагнітним зв'язком між полем серцевини та полем оболонки.

Інші моди такого хвильоводу характеризуються наявністю поля лише в елементах оболонки хвильоводу. Просторові розподіли цих мод представлені на рис. 2.17.

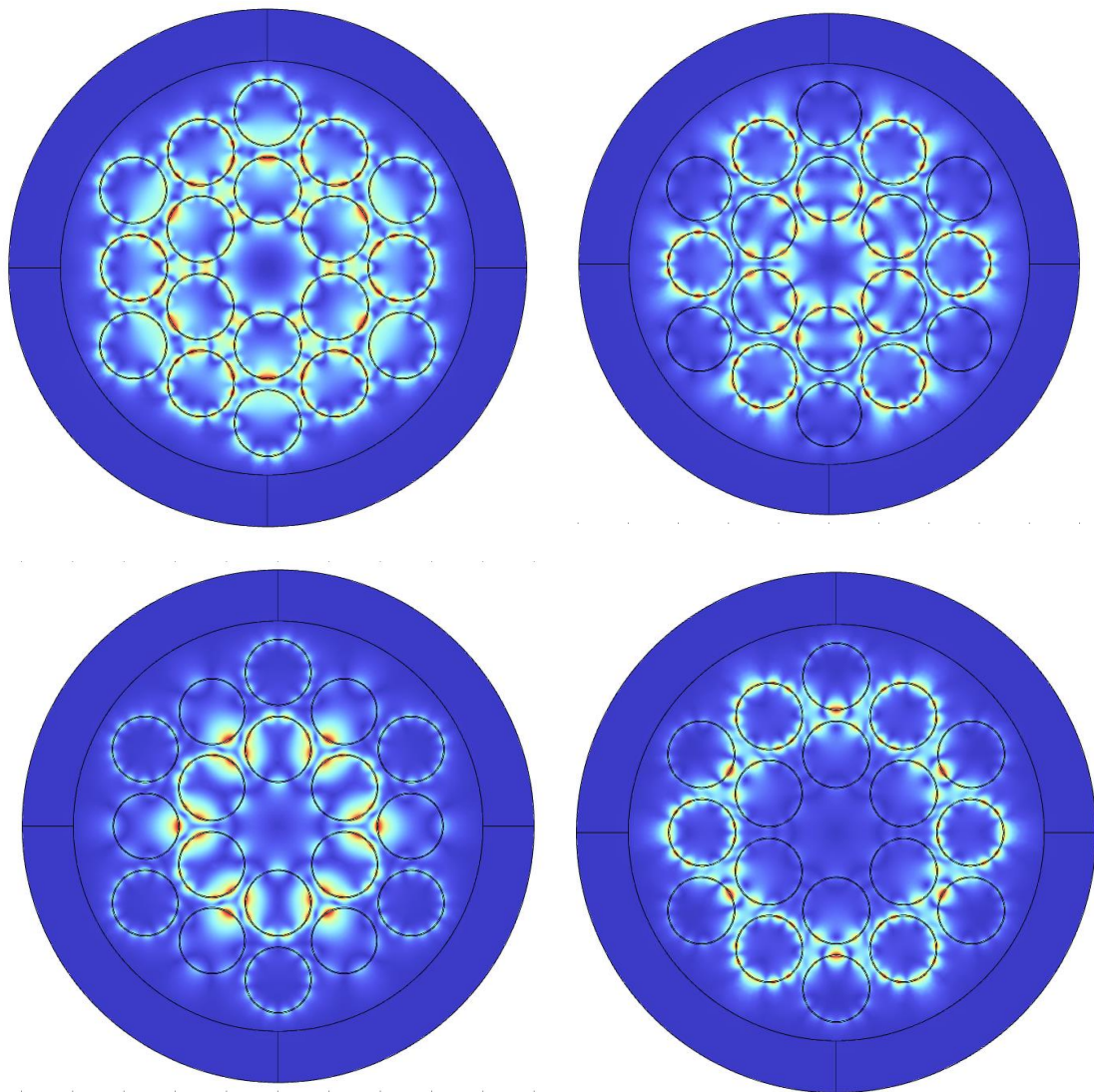
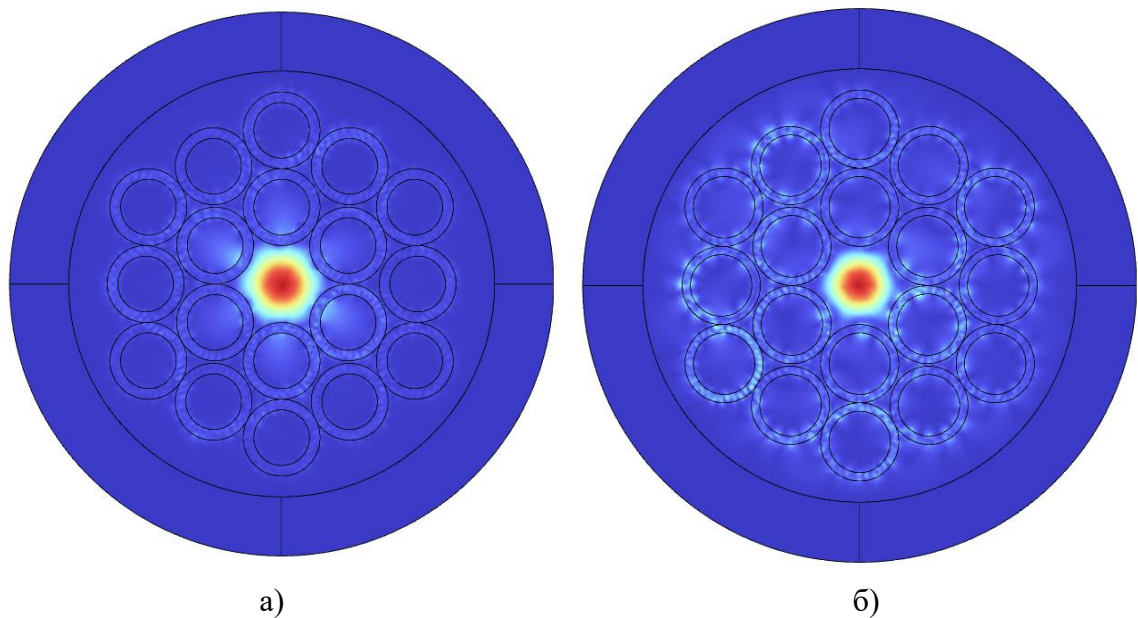


Рисунок 2.17 – Просторові розподіли полів мод у перетині хвильоводу

Верхні два просторові розподіли поля на рис. 2.17 характеризуються комплексними значеннями ефективних індексів мод. Нижні два розподіли відповідають дійсним значенням ефективних індексів.

Розглянемо далі власні режими хвилеводу для випадку, коли трубчасті елементи оболонки розташовані впритул. В цьому випадку структура близька до характерної решітки КагOME, представленої на рис. 2.9.

Результати розрахунків представлені на рис. 2.18. Тут показані просторові розподіли електричного поля для двох мод системи з різними значеннями ефективного індексу.



а) $n_{eff} = 0,995$; б) $n_{eff} = 0,9934$.

Рисунок 2.18 – Просторові розподіли полів мод у перетині хвилеводу

З рисунків видно, що наведені розподіли характеризуються наявністю поля як у серцевині, так і у оболонці хвилеводу. Спостерігається типова ситуація для волоконних хвилеводів з решіткою КагOME, а саме, поле у оболонці хвилеводу концентрується переважно у діелектрику та характеризується високочастотними осциляціями.

Зменшення товщини стінок діелектричних трубчастих елементів до 0,1 мкм призводить до суттєвої зміни модового складу мікроструктурного хвилеводу. В цьому випадку відсутні моди з концентрацією енергії в пустотілій серцевині хвилеводу. Але реалізується досить незвична мода, яка характеризується концентрацією поля в серединах трубчастих елементів, які оточують пустотілу серцевину. Просторовий розподіл електричного поля для цієї моди представлений на рис. 2.19.

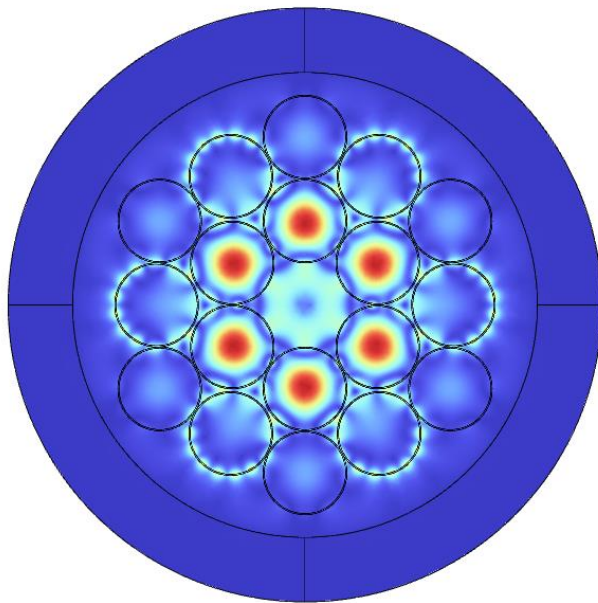


Рисунок 2.19 – Просторовий розподіл поля у перетині хвилеводу

З рисунку також видно, що поряд із концентрацією поля в пустотілих отворах трубчастих елементів реалізується також певний розподіл поля в інших елементах оболонки хвилеводу. Цей розподіл поля практично співпадає із розподілами, отриманими вище для мод оболонки, які характеризуються послабленим електромагнітним зв'язком із модами серцевини хвилеводу. Але тепер мова може йти лише про послаблений зв'язок між модами, локалізованими в шести трубчастих елементах, та полем оболонки, яке спостерігається в інших елементах оболонки хвилеводу.

Отриманий розподіл поля може бути використаний, наприклад, для створення сенсорних пристроїв для газоподібних та рідких речовин, які розташовані всередині трубчастих елементів з максимальною концентрацією поля. Така конструкція може забезпечити високі значення чутливості завдяки збільшенню об'єму взаємодії поля з речовиною та інтенсивності цього поля.

Більше того, оскільки в цьому випадку інтенсивне поле існує одразу у шести трубчастих елементах, з'являється можливість розроблення комбінованих сенсорних структур, де можна використовувати різні комбінації речовин, які підлягають дослідженню.

ВИСНОВКИ

Поряд з детальним аналізом структури та властивостей решітки Кагоме, яка є перспективною платформою в сучасній фотоніці, в роботі розглядалися фізичні основи, класифікація, принцип роботи та технологічні переваги волокон з фотонним кристалом.

Періодичні зміни показника заломлення поперечного перерізу дозволяють волоконним кристалам ФКВ демонструвати радикально новий метод регулювання поширення світла. Це дозволяє контролювати структуру моди сигналу, поляризацію, дисперсію та фотонні заборонені зони. ФКВ класифікуються як волокна з індексною направленістю або фотонні заборонені зони на основі типу обмеження світла, що визначає їх функціональні можливості.

Особливу увагу приділяють волокнам з решіткою Кагоме, оскільки вони забезпечують широкий спектр пропускання, низькі втрати та можливість створення хвилеводів з повітряним сердечником. Аналіз показує, що навіть за відсутності класичної фотонної забороненої зони енергія світлового поля ефективно локалізується в серцевині таких структур. Це стає можливим завдяки низькій щільності режимів оболонки, мінімальному перекриттю полів і помітній розбіжності в константах поширення між режимами серцевини та оболонки.

При виготовленні волокон з фотонним кристалом з решіткою Кагоме особливо важливим є використання полімерних матеріалів, таких як ПММА. Навіть у телекомунікаційних діапазонах вони забезпечують гнучкість, доступність та можливість виготовлення волокон з мінімальними втратами.

Ці структури привабливі не тільки для фотоніки, але й для квантових обчислень, метаматеріалів та сенсорних технологій завдяки своїм основним фізичним характеристикам, які включають плоскі енергетичні смуги, конуси Дірака та топологічні ефекти.

Огляд демонструє, що розвиток новітніх фотонних систем, оптичних датчиків, телекомунікаційних мереж та топологічних фотонних пристроїв базується на фотонних кристалічних волокнах з решітками Кагоме. Покращення технологій виробництва, зменшення втрат, використання нових матеріалів та створення на їх основі квантових фотонних елементів повинні стати головними завданнями майбутніх досліджень.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Qiu M., Sipe J. E. Analysis of guided modes in photonic crystal fibers // *Journal of the Optical Society of America B*. 2002. Vol. 19, № 9. P. 1855–1862.
2. Wu F.-F., Zhang X.-F. Kagome photonic crystals and topological light confinement // *Optics Communications*. 2020. Vol. 475. P. 126182.
3. Russell P. St. J. Photonic crystal fibers // *Science*. 2003. Vol. 299. P. 358–362.
4. Knight J. C. Photonic crystal fibres // *Nature*. 2003. Vol. 424. P. 847–851.
5. Couny F., Benabid F., Light P. S. Large-pitch kagome-structured hollow-core photonic crystal fiber // *Optics Letters*. 2006. Vol. 31, № 24. P. 3574–3576.
6. Benabid F., Knight J. C., Russell P. St. J. Hollow-core photonic crystal fibers: New light guidance mechanism // *Optics Express*. 2002. Vol. 10, № 21. P. 1195–1203.
7. Litchinitser N. M. Structured light meets structured matter // *Science*. 2012. Vol. 337, № 6091. P. 1054–1055.
8. Belardi W., Poletti F. Hollow core fiber with Kagome lattice // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. 2009. Vol. 27, № 19. P. 3945–3953.
9. Yu F., Wadsworth W. J., Knight J. C. Low loss kagome hollow-core fibers for transmission in the near-IR // *Optics Express*. 2012. Vol. 20, № 10. P. 11153–11158.
10. Pureur V., et al. Flat bands in the kagome lattice // *Physical Review B*. 2019. Vol. 99.
11. Kevrekidis S. D., Kevrekidis I. G. *Nonlinear Waves in Kagome Lattices*. – Springer, 2017. 212 p.
12. Lu L., Joannopoulos J. D., Soljačić M. Topological photonics // *Nature Photonics*. 2014. Vol. 8. P. 821–829.
13. Rechtsman M. C., Zeuner J. M., Plotnik Y., et al. Photonic Floquet topological insulators // *Nature*. 2013. Vol. 496. P. 196–200.
14. Miri M.-A., Alù A. Topological photonics: concepts and applications // *Science*. 2019. Vol. 363, № 6422.
15. Sakoda K. *Optical Properties of Photonic Crystals*. 2nd ed. Springer, 2001. 371 p.

16. Joannopoulos J. D., Meade R. D., Winn J. N. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. 2nd ed. Princeton University Press, 2008. 304 p.
17. Sashkova Y.V., Odarenko E.N., Shmat'ko A.A., Shevchenko N.G. Analysis of Slow Wave Modes in Modified Photonic Crystal Waveguides Using the MPB Package // IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. 2018, July 2-5, Kyiv, Ukraine, P. 164–167.
18. Ivzhenko L.I., Polevoy S.Yu., Odarenko E.N., Tarapov S.I. Dispersion properties of artificial topological insulators based on an infinite double-periodic array of elliptical quartz elements // Радіофізика та Електроніка. 2021. Т. 26, № 3.
19. Wu L., et al. Observation of flat bands and Dirac cones in photonic Kagome lattices // Nature Physics. 2022. Vol. 18. P. 99–105.
20. Sato M., Tanaka Y. Photonic analogues of topological insulators // Reports on Progress in Physics. 2017. Vol. 80, № 7. P. 076501.