

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна

Факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем
Кафедра теоретичної радіофізики

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. завідувача кафедри

_____ В. В. Хардіков
підпис ініціали, прізвище

“ _____ ” _____ 2024 року

**Кваліфікаційна робота
магістра**

на тему: Симуляція власних режимів об'ємного резонатора, який заповнений
середовищем з показником заломлення близьким до нуля у певному
діапазоні частот.

Виконала: студентка II курсу магістратури, групи РР-61
спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали,
освітньо-професійна програма «Радіофізика і електроніка»

Керівник
канд. фіз.-мат. наук



Ірина ЄЗЛОВЕЦЬКА

Марія АНТЮФЄЄВА

2024 рік

РЕФЕРАТ

Єзловецька І. В. Симуляція власних режимів об'ємного резонатора, який заповнений середовищем з показником заломлення близьким до нуля у певному діапазоні частот. Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали». Харків. Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, кафедра теоретичної радіофізики, 2024, 8 рис., 4 табл., 49 стор., 18 посилань. .

У кваліфікаційній роботі магістра розглянуто задачу про електромагнітні поля у резонаторі з ідеально провідними стінками, що заповнений штучним матеріалом з дисперсією, таким що його показник заломлення близький до нуля в певному діапазоні частот.

У роботі проведено аналіз типів середовищ з показником заломлення близьким до нуля (NZIM), таких як середовище з надмалою діелектричною проникністю (ENZ), середовище з надмалою магнітною проникністю (MNZ) та середовище у якого і магнітна і діелектрична проникності наближаються до нуля (EMNZ), їх структурних властивостей, механізмів формування та методів отримання за літературними джерелами. Розглянуто дослідження в недавніх публікаціях особливості взаємодії NZIM із резонаторними структурами. Робота присвячена особливостям власних мод мікрохвильового резонатора, заповненої таким дисперсійним середовищем. Задача розглядається за допомогою програмного забезпечення COMSOL Multiphysics. Наведено та проаналізовано отримані просторові розподіли електричного та магнітного полів та власних частот.

Ключові слова: власні режими, мікрохвильовий резонатор, метаматеріали, штучні матеріали, часова дисперсія, показник заломлення близький до нуля

SUMMARY

Yezlovetska I. Eigenmode simulation of a cavity resonator filled with a medium with a near-zero refractive index in a certain frequency range. Qualification work of Master on 105 «Applied physics and nanomaterials». Kharkiv. V. N. Karazin Kharkiv National University, Department of theoretical physics, 2024, 8 figures, 4 tables, 49 pages, 18 references.

The master's qualification work deals with the problem of electromagnetic fields in a cavity resonator with perfectly conducting walls, which is filled with an artificial material with a dispersion such that its refractive index is close to zero in a certain frequency range. An analysis of near-zero-index material (NZIM) types, such as epsilon-near-zero (ENZ), mu-near-zero (MNZ) and epsilon-mu-near-zero (EMNZ), their structural properties, formation mechanisms and methods of obtaining them according to literature sources was conducted in the work. The study of the features of the interaction of NZIM with resonator structures in recent publications was considered. The work is focused on the features of eigenmodes of the cavity resonator filled with such a dispersive medium. Problem considered with COMSOL Multiphysics software. The obtained spatial distributions of electric and magnetic fields and eigenfrequencies are presented and analyzed.

Key words: cavity resonator, eigenvalues, metamaterial, artificial material, temporal dispersion, near-zero-refractive index

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	2
SUMMARY	3
ЗМІСТ	4
ВСТУП.....	5
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	6
1.1 Типи матеріалів із майже нульовим показником заломлення (NZIM) 6	
1.2 Структура NZIM та методи їх отримання	10
1.3 Поєднання NZIM з резонаторами для посилення оптичних ефектів	16
1.4 Корисні властивості NZIM.....	21
1.5 Застосування NZIM в передових технологіях	23
1.6 Дослідження електромагнітних властивостей в різних діапазонах хвиль	29
1.7 Застосування NZIM в поєднанні з резонаторними структурами	31
2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ОПИС СЕРЕДОВИЩА	34
3. СИМУЛЯЦІЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ПАКЕТУ COMSOL MULTIPHYSICS	37
3.1 Моделювання за допомогою COMSOL Multiphysics	37
3.2 Власні режими резонатора, який заповнено середовищем без дисперсії.....	38
3.3 Власні режими резонатора, який заповнено середовищем з дисперсією	43
ВИСНОВОК.....	46
ЛІТЕРАТУРА.....	47

ВСТУП

Сучасні досягнення в галузі нанофотоніки та метаматеріалів відкрили нові горизонти для управління світлом і створення інноваційних пристроїв. Однією з найперспективніших технологій є матеріали із майже нульовим показником заломлення Near-Zero-Index Materials (NZIM). Ці матеріали забезпечують унікальні оптичні властивості, які дозволяють значно підвищити ефективність таких процесів, як фокусування світлових хвиль, керування фазою і груповою швидкістю, а також посилення локальної густини фотонних станів. Особливо цікавим є питання взаємодії таких середовищ з різноманітними мікрохвильовими структурами, такими як хвилеводи та резонатори[1].

У роботі наведено огляд аналізу фізичних принципів формування NZIM, зокрема їх структури, типів і механізмів появи. Такі матеріали, як ENZ (Epsilon-Near-Zero), MNZ (Mu-Near-Zero), та EMNZ, мають широкі перспективи у різних галузях науки та техніки, включаючи надшвидку оптику, квантові комунікації, антенні системи та лазерні технології. В огляді приділено увагу методам отримання NZIM, які базуються як на створенні складних метаматеріалів із ретельно спроектованими структурами, так і на використанні природних матеріалів, таких як прозорі провідні оксиди (ITO, AZO). Також розглянуто механізми резонансних явищ і їх вплив на формування майже нульового показника заломлення. Описані та проаналізовані в огляді проблеми Аналіз властивостей NZIM у поєднанні з резонаторними структурами також демонструє перспективи створення високочутливих сенсорів, пристроїв для оптичної обробки інформації та енергозберігаючих оптоелектронних компонентів.

Ця робота спрямована на верифікацію теоретичних досліджень за допомогою сучасного засобу моделювання фізичних процесів COMSOL Multyphysics®. В роботі за допомогою програмного пакету моделюються власні процеси в об'ємному мікрохвильовому резонаторі з ідеально провідними стінками. Резонатор заповнено середовищем показник

заломлення якого має дисперсійні властивості у часі і внаслідок цього в певному діапазоні частот є близьким до нуля.

Таким чином, результати роботи сприяють поглибленню розуміння фізичних властивостей NZIM та створенню нових платформ для їх практичного використання у передових технологіях.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Типи матеріалів із майже нульовим показником заломлення (NZIM)

Матеріали з майже нульовим показником заломлення (NZIM) належать до класу матеріалів, для яких характерний показник заломлення, близький до нуля. Завдяки цьому вони мають унікальні оптичні властивості керуванні світлом, зокрема в розробці мікрооптичних та нанофотонічних пристроїв [9].

Формування NZIM базується на резонансних явищах у структурі матеріалу, що забезпечує досягнення специфічних оптичних характеристик, коли показник заломлення наближається до нуля. Механізми формування таких матеріалів залежать від фізичних властивостей середовища, а також від взаємодії електромагнітних хвиль із електронами.

Серед NZIM можна виокремити три основні типи, кожен із яких має специфічну фізичну природу та визначається унікальними умовами формування:

1.1.1 ENZ (Epsilon-Near-Zero) матеріали

Для цього типу матеріалів характерна діелектрична проникність ϵ , яка наближається до нуля, тоді як магнітна проникність μ залишається відмінною від нуля. ENZ-матеріали є потенційними для створення структур із високою спрямованістю випромінювання та підвищеною ефективністю фокусування [10],[6],[14].

У ENZ-матеріалах вільні електрони компенсують позитивний внесок зв'язаних електронів у діелектричну проникність. Унаслідок цього значення діелектричної проникності ϵ наближається до нуля на певній довжині хвилі,

створюючи середовище з мінімальним заломленням хвиль. Концепцію ENZ можна зрозуміти за допомогою діелектричної проникності для матеріалів з оксидами провідних металів (TCO), яка описується рівнянням Друде–Лоренца [8] :

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - Ne^2 / \varepsilon_0 m^* \omega(\omega + i\gamma) \quad (1.1)$$

$\varepsilon(\omega)$ — діелектрична проникність як функція частоти

ε_{∞} — діелектрична проникність на високих частотах

N — концентрація вільних носіїв заряду (електронів)

e — заряд електрона

ε_0 — діелектрична проникність вакууму

m^* — ефективна маса носіїв заряду

ω — кутова частота світла

γ — частота зіткнень (загасання)

i — уявна одиниця

Коли густина вільних носіїв стає достатньо великою (приблизно 10^{20} – 10^{21} см⁻³), негативний внесок через вільні електрони майже компенсує позитивний внесок ε_{∞} що дозволяє досягти значення діелектричної проникності, близького до нуля, у телекомунікаційному спектральному діапазоні. Це відкриває широкі можливості для практичного застосування, адже ENZ матеріали здатні значно підсилювати нелінійні оптичні ефекти, такі як генерація третьої та вищих гармонік, а також перехресну фазову модуляцію. Це може бути корисним для створення нелінійних оптичних пристроїв із покращеними характеристиками, зокрема для телекомунікаційних технологій.

1.1.2 MNZ (Mu-Near-Zero) матеріали

MNZ-матеріали — це клас матеріалів із майже нульовим показником магнітної проникності (μ), тоді як діелектрична проникність (ε) залишається стабільною. Вони характеризуються унікальними властивостями, які дозволяють ефективно керувати магнітними характеристиками середовища.

Це робить їх застосування в антенних системах, оптичних і комунікаційних пристроях [9],[11],[6],[13].

Специфічні явища, які спостерігаються в MNZ-матеріалах, включають посилене фокусування магнітного поля, зниження хвильових втрат та приглушення магнітного поля, що забезпечує посилення хвильових ефектів. У таких матеріалах довжина хвилі (λ) і фазова швидкість (v_ϕ) прагнуть до нескінченності, тоді як хвильовий вектор (k) та різниця фаз ($\Delta\phi$) наближаються до нуля, що призводить до рівномірного розподілу фаз [9], [11]. Хвильовий імпеданс (Z) і групова швидкість (v_g) демонструють відмінні значення порівняно з іншими класами NZI-матеріалів, такими як ENZ та EMNZ.

Формування MNZ-матеріалів базується на резонансних явищах у металевих структурах. Ці резонанси дозволяють знизити магнітну проникність до значень, близьких до нуля, що створює середовище з унікальними магнітними властивостями. У результаті відбувається приглушення магнітного поля, яке сприяє появі специфічних хвильових ефектів, важливих для розробки комунікаційних та антенних систем [14].

1.1.3 EMNZ матеріали

EMNZ-матеріали — це особливий клас матеріалів, для яких обидва параметри, діелектрична проникність (ϵ) і магнітна проникність (μ), одночасно наближаються до нуля. EMNZ-матеріали забезпечують реалізацію принципово нових оптичних режимів, що дозволяють повністю контролювати фазову швидкість хвиль, які поширюються в середовищі [9].

Створення EMNZ-матеріалів зазвичай базується на використанні фотонних кристалів, які мають лінійну дисперсію зонної структури в околі точки $\Gamma = 0$. Такі фотонні кристали мають так звану Діраківську точку, де показник заломлення наближається до нуля, а щільність фотонних станів також зникає [14]. Оскільки у цій точці EMNZ матеріал втрачає типову реакцію на світло, характерну для звичайних середовищ, і починає поводитись як ефективний однорідний матеріал із близькою до нуля проникністю.

У цьому випадку поширення електромагнітної хвилі можливе всередині шару, що зміщується на величину Δx_{EMNZ} , обчислювану за формулою [14]:

$$\Delta x_{EMNZ} = (\omega_Z \partial_{\omega} n_{\phi}(\omega_Z) - 1) L \frac{\hbar \omega}{Mc^2} \quad (1.2)$$

Де: \hbar — це константа Планка

ω — це кутова частота фотона

c — швидкість світла

ω_Z — частота на якій працює матеріал

$\partial_{\omega} n_{\phi}(\omega_Z)$ — похідна від фазового показника заломлення по частоті

L — довжина шляху в матеріалі

M — маса

Цей шар набуває імпульсу, що визначається наступним виразом[14]:

$$p_{slab} = \left(1 - \frac{1}{\omega_Z \partial_{\omega} n_{\phi}(\omega_Z)}\right) \cdot \frac{\hbar \omega}{c} \quad (1.3)$$

де: $\omega_Z \partial_{\omega} n_{\phi}(\omega_Z)$ — показує, як змінюється імпульс через взаємодію з матеріалом

$\frac{\hbar \omega}{c}$ — базовий імпульс фотона

Ці формули описують властивості EMNZ матеріалів, які забезпечують ефективне поширення хвиль без значної зміни фазової швидкості, а це, в свою чергу, призводить до своєрідного зсуву шару матеріалу.

На відміну від класичних фотонних кристалів, які зазвичай мають заборонену фотонну зону, фотонні кристали з властивостями EMNZ можуть одночасно сприяти поширенню електромагнітного випромінювання та придушувати спонтанне випромінювання. Це явище є особливо важливе розробки лазерних платформ, де потрібно забезпечити кероване випромінювання в межах певних частотних діапазонів.

Фотонні кристали, що мають властивості EMNZ, дозволяють поєднувати дві унікальні властивості в одному матеріалі: можливість поширення електромагнітного випромінювання без значної втрати енергії та

інгібування спонтанного випромінювання. Це робить EMNZ-фотонні кристали корисними для широкого спектра застосувань у фотоніці, таких як створення високоефективних лазерів і керованих фотонних схем. EMNZ-фотонні кристали мають здатність значно пригнічувати спонтанне випромінювання, що дозволяє мінімізувати неконтрольоване розсіювання світла. Це критично важливо для забезпечення стабільності та підвищення надійності фотонних пристроїв.

EMNZ-фотонні кристали відкривають нові перспективи для інтеграції оптичних та електромагнітних компонентів. Можливість точного налаштування параметрів поширення й випромінювання світла в таких матеріалах сприяє розробці більш компактних лазерів і оптичних схем, здатних ефективно функціонувати на нанорівні. Це має значний потенціал для розробки мініатюрних пристроїв у телекомунікаціях, квантових обчисленнях та інших передових технологіях, що вимагають високо контрольованого світлового потоку.

1.2 Структура NZIM та методи їх отримання

Структура NZIM залежить від типу матеріалу, методу його отримання та області застосування. Існує декілька підходів до створення матеріалів із майже нульовим показником заломлення:

1.2.1 Метаматеріали

Метаматеріали є революційним підходом до створення штучних матеріалів, які володіють винятковими оптичними властивостями. Завдяки ретельно спроектованим періодичним структурам, вони здатні на досягнення характеристик, яких не має жоден природний матеріал. Зокрема, NZIM можуть бути створені за допомогою саме таких структур. Основою для цього є мікроскопічні металеві або діелектричні елементи, менші за довжину хвилі світла [5]. Ці складові дозволяють інженерам маніпулювати електромагнітними хвилями на безпрецедентному рівні, надаючи можливість

контролювати напрямок, швидкість та фокусування світла з винятковою точністю.

Метаматеріали для NZIM обладнуються резонансними структурами, що вступають у взаємодію з електромагнітним полем та дозволяють досягти показника заломлення, наближеного до нуля, у певних частотних діапазонах. Щоб цього досягти, розмір цих структур має залишатись мінімальним порівняно з довжиною хвилі світла, з якою вони працюють, — таке зменшення є ключовим для ефективної взаємодії з хвилею та створення бажаного резонансного ефекту [8].

Метаматеріали це технології наступного покоління: надчутливих вимірювальних приладів, динамічних радіочастотних компонентів і оптоелектронних систем, що охоплюють широкий частотний спектр. Це надзвичайно важливо для швидко зростаючих вимог сучасного світу, зокрема в областях бездротового зв'язку, обробки інформації та зберігання даних [9].

1.2.2 Природні матеріали

Деякі природні матеріали, як-от оксиди металів і нітриди, демонструють NZIM-властивості в інфрачервоному діапазоні. Це розширює можливості застосування NZIM, зокрема в тепловізійній техніці та оптичних сенсорах. Необхідно деталізувати механізми взаємодії в оксидах металів та нітридах

Ці матеріали, такі як оксид індію-олова (ITO) та оксид алюмінію-цинку (AZO), є одними з найбільш перспективних природних матеріалів з властивостями ENZ. Їхня діелектрична проникність може бути налаштована шляхом зміни концентрації легуючих домішок, наприклад, алюмінію в ZnO, що дозволяє досягти ENZ-умов у ближньому інфрачервоному діапазоні. Це створює передумови для адаптації матеріалів під конкретні технологічні вимоги. TCO (прозорі електропровідні оксиди) мають переваги завдяки своїй сумісності з CMOS (комплементарні метало-оксидні напівпровідники) - технологіями, що робить їх особливо привабливими для інтеграції в оптичні схеми, використовувані в сучасних електронних пристроях. До основних

представників TCO відносяться ITO, AZO та Ga:ZnO, які знайшли широке застосування в виробництві дисплеїв та сонячних елементів. Деякі інші оксиди металів, такі як TiO₂ та NiO, також можуть демонструвати ENZ-властивості[5]. Ці матеріали відкривають додаткові можливості для розробки нових оптичних пристроїв.

Нітрид титану (TiN) є ще одним перспективним природним ENZ матеріалом, який відзначається високою температурою плавлення та хімічною стійкістю. Це робить його придатним для застосувань, де потрібна висока надійність, таких як електроніка та матеріали для високих температур. Нітрид алюмінію (AlN): також демонструє ENZ-властивості, що робить його потенційно корисним у високочастотних технологіях та оптоелектроніці [5].

Гексагональний нітрид бору (hBN) може проявляти гіперболічну дисперсію, яка пов'язана з NZIM, що робить його об'єктом досліджень у галузі нанотехнологій та фотоніки [11].

1.2.3 Механізми появи NZIM-властивостей в оксидах металів і нітридах

NZIM-властивості виникають внаслідок складної взаємодії світла з електронною структурою матеріалу. Для оксидів металів та нітридів, таких як ITO (оксид індію-олова) та AZO (оксид алюмінію-цинку), вільні електрони відіграють ключову роль у формуванні цих властивостей. Вільні електрони в матеріалі вносять негативний вклад у діелектричну проникність (ϵ), і цей вклад зростає зі збільшенням концентрації електронів. На певній частоті, відомій як частота плазмонного резонансу, негативний внесок вільних електронів компенсує позитивний внесок зв'язаних електронів, що призводить до того, що реальна частина ϵ наближається до нуля. Це явище є основою для виникнення ENZ-властивостей і призводить до виникнення NZIM-властивостей. Наприклад, для прозорих провідних оксидів (TCO), таких як ITO та AZO, при досягненні певної концентрації вільних електронів (на рівні $10^{20} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$), на певних довжинах хвиль, зокрема в телекомунікаційному спектрі, спостерігається ефективне анулювання електричних вкладів, що призводить

до прояву ENZ-властивостей. В результаті, такі матеріали демонструють низьку групову швидкість, підвищену дифракцію та посилення нелінійних явищ, таких як генерація вищих гармонік і крос-фазова модуляція[8]. Окрім концентрації вільних електронів, на прояв NZIM-властивостей в матеріалі впливають кілька інших важливих факторів. Кристалічна структура безпосередньо впливає на рухливість вільних електронів і, таким чином, на їх внесок у діелектричну проникність. Певні структури можуть сприяти більш ефективному руху електронів, що підвищує ймовірність виникнення ENZ-подібних властивостей. Легування, тобто введення домішок, може суттєво змінити концентрацію вільних електронів, їх рухливість, а також зміщувати частоту плазмонного резонансу. Це дозволяє точніше налаштовувати NZIM-властивості матеріалу під конкретні вимоги. Положення плазмонного резонансу, при якому діелектрична проникність наближається до нуля, залежить від таких параметрів, як концентрація вільних електронів, їх ефективна маса та частота зіткнень. Це дозволяє точніше контролювати, при яких умовах матеріал проявлятиме NZIM-властивості. Дисперсія, тобто залежність діелектричної проникності від частоти, а також поглинання світла в матеріалі, безпосередньо впливають на NZIM-властивості, визначаючи, як поведуться хвилі, що проходять через матеріал. Хоча наукові джерела не надають повної інформації про всі механізми, які можуть сприяти виникненню NZIM-властивостей, можна припустити, що деякі інші фактори також можуть відігравати важливу роль. Дефекти кристалічної решітки, такі як вакансії та міжвузлові атоми, можуть впливати на рухливість вільних електронів та їх взаємодію зі світлом. Дефекти можуть локалізувати або розсіювати електронні стани, що може змінити ефективну діелектричну проникність. У наноструктурованих матеріалах поверхневі ефекти можуть суттєво впливати на оптичні властивості. Для матеріалів з майже нульовим показником заломлення поверхневі стани можуть взаємодіяти зі світлом, змінюючи його поведінку в таких середовищах. У деяких випадках квантові ефекти можуть відігравати важливу роль у формуванні NZIM-властивостей. Квантові

флуктуації або зміна енергетичних рівнів у наномасштабних матеріалах можуть впливати на оптичні характеристики, які проявляються на макроскопічному рівні. Таким чином, NZIM-властивості в оксидах металів і нітридах виникають завдяки складному поєднанню кількох фізичних механізмів, включаючи вплив вільних електронів, плазмонних резонансів, кристалічної структури та багатьох інших факторів. Ці властивості відкривають широкі можливості для нових технологій у фотоніці, оптиці та електроніці.

1.2.4 Хвилеводи

Хвилеводи, які працюють на частоті відсікання, дійсно можуть виступати як ефективні двовимірні NZIM. В таких структурах можливе «розтягування» простору між частинами хвилеводу, не впливаючи на зовнішні електромагнітні величини.

У середовищах з ефектом EMNZ хвилеводи можуть мати електромагнітно великий об'єм, який поводить себе як «єдина точка» з електромагнітної точки зору ззовні. Наприклад, зовнішня межа хвилеводу може мати ідеальну електричну провідність, що дозволяє досягти ідеальної передачі електромагнітних хвиль незалежно від геометрії та розміру області EMNZ.

Наближенні нульові індексні NZI середовища характеризуються тим, що електромагнітне випромінювання в них поводить себе як ідеальна електромагнітна рідина. В таких середовищах електромагнітний потік енергії підпорядковується рівнянням, подібним до рівнянь руху для ідеальної рідини, що запобігає виникненню оптичної турбулентності. Експериментальні дослідження показали [14], що в хвилеводах, що працюють на частоті відсікання, відбувається розподіл електромагнітного потоку, який демонструє відсутність вихорів, що є характерною ознакою NZIM.

Прямокутні металеві хвилеводи, що працюють на частоті відсікання TE₁₀, можуть імітувати двовимірне середовище з ефективною діелектричною

проникністю, близькою до нуля[6]. У цьому випадку хвилевід веде себе як матеріал для поширення електромагнітних хвиль. Експерименти [15] показують, що такі хвилеводи можуть слугувати моделями ідеальних електромагнітних рідин. Візуалізація розподілу потоку потужності в таких хвилеводах підтверджує відсутність вихорів.

Спеціальні геометрії хвилеводів дозволяють досягати ефекту повного поглинання або перенаправлення світлових потоків, що є критично важливим для розвитку нових технологій. Хвилеводи з властивостями NZIM дозволяють створювати резонатори, які не потребують складних конструкцій. Таким чином, форма та розмір області NZIM не впливають на поширення електромагнітних хвиль ззовні.

Хвилеводи з оболонкою з ENZ матеріалу забезпечують високий ступінь обмеження моди і низькі втрати під час поширення світла. При цьому важливо, що ENZ шар може покривати лише критичні вигини і перетворення діелектричних хвилеводів, де оптичні втрати знижуються. Зокрема, в області 90° вигину кремнієвого хвилеводу, завдяки ENZ матеріалам, досягається підвищена передача світла. Втрати матеріалів у системі ENZ можуть бути мінімізовані, що значно покращує ефективність передачі[10].

Всі ці властивості сприяють розробці технологій з низькими втратами енергії. Відсутність вихорів у потоці потужності в NZIM хвилеводах означає, що енергія не розсіюється через турбулентність, що суттєво покращує ефективність передачі. Високий ступінь обмеження моди в ENZ хвилеводах зменшує втрати на випромінювання, роблячи ці технології ще більш привабливими для практичного використання.

Зменшення перехресних перешкод між сусідніми хвилеводами дозволяє створювати компактні та ефективні оптичні схеми, для їх використання в сучасних електронних і оптичних системах. Важливо зазначити, що практична реалізація NZIM хвилеводів для конкретних застосувань може вимагати додаткових досліджень та оптимізації, щоб повністю реалізувати їх потенціал.

1.3 Поєднання NZIM з резонаторами для посилення оптичних ефектів

Комбінація NZIM та резонаторів відкриває широкі можливості для посилення певних оптичних ефектів завдяки синергії між унікальними властивостями NZIM та здатністю резонаторів накопичувати енергію на визначених частотах. Поєднання NZIM і резонаторів створює ряд корисних ефектів, таких як підсилення нелінійної оптики, покращення фазового контролю та ефективніше керування потоком електромагнітної енергії [8].

1.3.1 Підвищення локальної густини фотонних станів (LDOS)

ENZ демонструють властивості, завдяки яким можна суттєво підвищити локальну густину фотонних станів (LDOS) у матеріалі. Особливістю таких матеріалів є здатність підсилювати взаємодію світла з матеріалом у точках, де діелектрична проникність ϵ прямує до нуля, що підвищує ефективність нелінійних оптичних процесів, таких як генерація гармонік, частотне змішування та перехресна фазова модуляція. Підвищення LDOS також сприяє локалізації фотонних станів у резонаторах і може використовуватися для створення високоефективних, мініатюрних оптичних пристроїв, таких як генератори високочастотних гармонік та модулі для світлових хвиль.

Локальна густина станів (ЛГС) визначає кількість доступних електромагнітних мод на одиницю об'єму та частоти в певній точці простору. Її підвищення дозволяє збільшити взаємодію світла з речовиною, що особливо важливо для таких застосувань, як спонтанне випромінювання, нелінійна оптика та квантова інформатика. Завдяки здатності NZIM змінювати ЛГС, вони набувають значення у численних прикладних напрямках.

У матеріалах NZIM виникає ефект "суперзчеплення", обумовлений збільшенням ЛГС у відповідних областях. Це дозволяє збільшити швидкість спонтанного випромінювання від емітерів, розташованих поблизу NZIM, що важливо для багатьох оптичних та фотонних пристроїв.

ENZ матеріали підсилюють нелінійну оптичну реакцію, що частково зумовлено підвищеною ЛГС. Це можна використовувати для підвищення

ефективності генерації гармонік, світлового перемикання та модуляції, що є ключовими процесами в сучасних оптичних комунікаціях і фотонних обчисленнях.

1.3.2 Керування фазою і груповою швидкістю

ENZ-матеріали, дозволяють маніпулювати фазовою та груповою швидкостями електромагнітних хвиль. Матеріали NZIM дозволяють високоточно налаштовувати фазові співвідношення в резонаторах. Це дозволяє створювати умови для конструктивної інтерференції та значного резонансного підсилення конкретних мод. Таким чином, метаматеріали NZIM забезпечують платформу для новітніх рішень в адаптації та керуванні взаємодією світла з матеріалом.

Було розроблено експеримент для прямого відображення векторного поля Пойнтінга в прямокутному хвилеводі, що працює на межі режиму TE₁₀, виступаючи як двовимірне середовище NZI. Результати експериментально підтверджують особливості поведінки середовищ ENZ, де електромагнітне випромінювання поводить себе подібно до ідеальної електромагнітної рідини [15]. Зображення показали, що потік енергії у хвилеводі плавно адаптується до геометричних деформацій, концентруючись навколо перешкод без утворення вихорів, що зазвичай виникають у турбулентних оптичних системах.

Стійкість поведінки потоку до топологічних деформацій, таких як введення діелектричних частинок (фотонних допантів), підтверджує потенціал NZI-матеріалів для застосувань у середовищах, які вимагають захисту від деформацій або механічних збурень. Для наочності, на рис. 1.1 показано симуляційні та експериментальні результати потоку потужності в ENZ та звичайних середовищах.

Це відкриває шлях до розвитку мультифізичних систем, інспірованих механікою рідин і теорією аеродинаміки, де оптична турбулентність може бути усунена на фундаментальному рівні.

Експеримент також надав унікальну можливість спостереження статичних розподілів електричного та магнітного полів із високою однорідністю у просторі та фазі, що є ключовими електродинамічними характеристиками двовимірних середовищ ENZ. Очікується, що ці результати сприятимуть подальшому вивченню екзотичних хвильових явищ, зокрема стабільних електромагнітних рідин, що володіють захистом від деформацій та турбулентних процесів, та підтримуватимуть розвиток нових оптичних пристроїв, здатних ефективно контролювати світловий потік у хвилеводах.

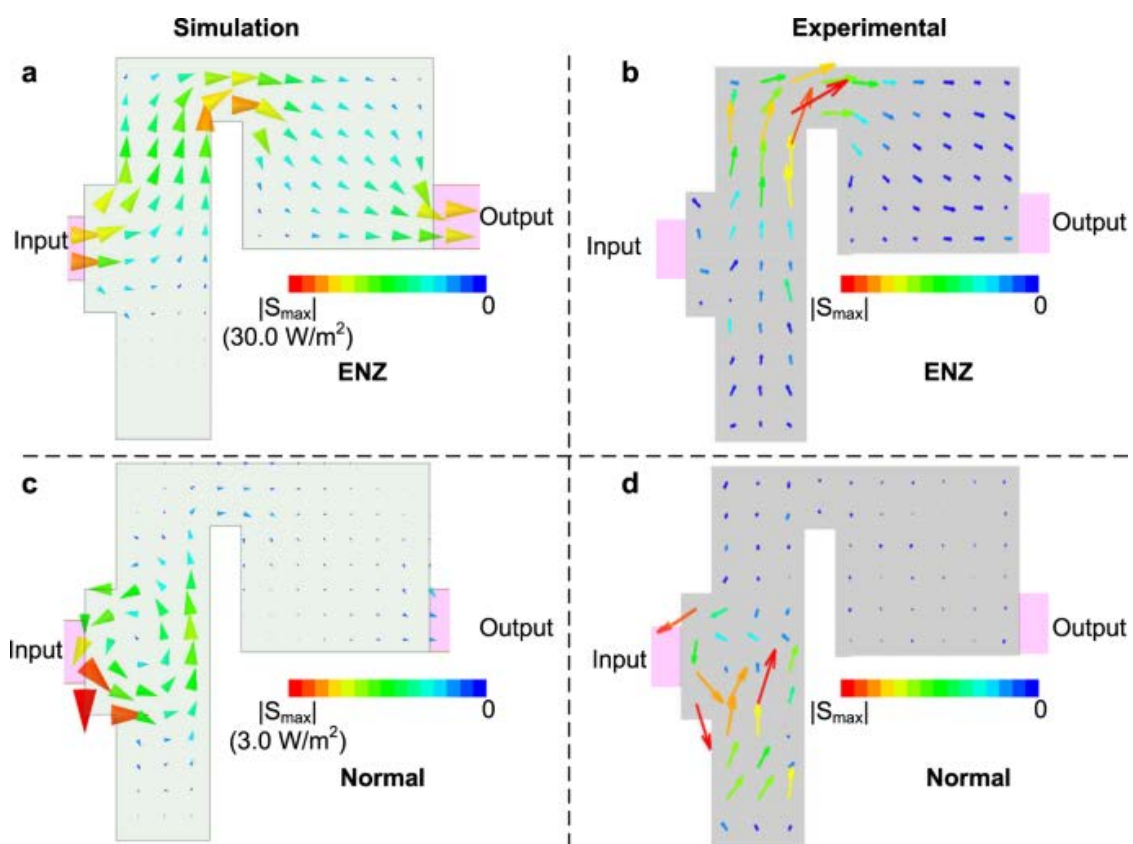


Рис. 1.1 Змодельований і експериментально зображений потік потужності в нелегованому ENZ і нормальному середовищі. а, б - змодельований і експериментально зображений потік потужності нелегованого середовища ENZ, с, d - змодельований і експериментально зображений потік потужності в нормальному середовищі. [15 с. 5]

1.3.3 Формування вузькосмугових резонансів у метаматеріалах ENZ

Взаємодія між резонаторами та ENZ метаматеріалами може призводити до утворення надзвичайно вузьких резонансних піків, які мають високу добротність (Q-фактор). Це дозволяє створювати високочутливі сенсори, фільтри та інші пристрої, що потребують високої спектральної селективності.[8].

ENZ метаматеріали є потужним інструментом для вибіркового контролю та локалізації світла через резонанси порожнини, що дозволяє досліджувати мезоскопічні явища та спрощує проектування фотонних пристроїв. У рамках експериментального дослідження продемонстровано ефективність проектування та активного керування режимами резонатора, а також налаштування їх взаємного зв'язку в багатопорожнинній структурі ENZ.

В особливості, використання рідкокристалічної плівки з високим подвійним променезаломленням як регульованої нанопорожнини дозволяє досягти залежного від поляризації зв'язування резонансних мод з вузькою спектральною шириною та просторовим протягом. Прилад поверхневих сил (SFA) забезпечує безперервний та точний контроль товщини рідкокристалічної плівки між нанопорожнинками, що дозволяє змінювати розстройку між режимами порожнини.

Таким чином, за рахунок такої маніпуляції можна контролювати поведінку проти перетину нанопорожнин, що відкриває повний потенціал регульованого оптичного зв'язку в метаматеріалах ENZ. Це забезпечує універсальний підхід до створення регульованих фотонних пристроїв, включаючи біофотонні датчики та регульовані планарні метаматеріали для спектрометрів на чіпі.

Резонансні порожнини, виготовлені шляхом розміщення прозорого діелектричного шару між двома частково відбиваючими дзеркалами, володіють інтригуючими властивостями ENZ на певних резонансних довжинах хвиль. Їх характеристики можна точно налаштувати шляхом вибору товщини та показника заломлення шарів металу та діелектрика, а також кута і поляризації вхідного світла. Багатопорожнинні резонатори дозволяють ефективно

маніпулювати електромагнітними хвилями в специфічних спектральних діапазонах і надають оптимальні рішення для мініатюризації пристроїв, виготовлення ідеальних поглиначів для структурного забарвлення в діапазоні VIS-NIR та досягнення високого фотоелектричного перетворення.

Крім того, обмеження фотонів в оптичних нанопорожнинах дозволяє контролювати взаємодію світла з матерією в фундаментальних фізичних дослідженнях одиночних квантових об'єктів та корельованих поляритонів, що відкриває нові перспективи в застосуваннях квантових оптичних пристроїв і датчиків.

1.3.4 Керування тепловим випромінюванням у матеріалах NZIM

NZIM характеристиками можуть суттєво модифікувати теплові властивості матеріалів, що впливає на їх випромінювальну здатність. Поєднання NZIM з резонаторами створює нові перспективи для проектування термоелектричних пристроїв та ефективного керування тепловим потоком.

Зокрема, властивості середовища, зокрема його діелектрична проникність, впливають на поведінку електромагнітних хвиль, включаючи теплове випромінювання, в точках ENZ. Це пов'язано з тим, що середній імпеданс збільшується[8],[13],[10], коли діелектрична проникність наближається до нуля, внаслідок чого середовище ENZ діє як поверхня з високим опором [8],[10] або як штучний магнітний провідник.

При цьому тангенціальні електричні поля підсилюються поблизу поверхні з високим імпедансом, що значно покращує взаємодію з ультратонкими металевими плівками. Це призвело до розробки кількох прототипів теплових випромінювачів на основі ультратонких металевих плівок, які демонструють високу ефективність. Оскільки екстремальні межі є внутрішньою характеристикою середовищ NZI, такі випромінювачі мають технологічну перевагу, оскільки не вимагають складних процесів нанофабрикації, а забезпечують вузькосмугові, але спектрально стійкі лінії випромінювання.

1.4 Корисні властивості NZIM

1.4.1 Фокусування електромагнітних хвиль

NZIM, і зокрема ENZ матеріали, мають здатність фокусувати електромагнітні хвилі. Вони можуть змінювати локальний імпеданс середовища, що дозволяє концентрувати та фокусувати енергію хвиль, коли діелектрична проникність матеріалу прямує до нуля. Завдяки цьому вони можуть значно підсилювати взаємодію світла з матеріалом і, відповідно, змінювати траєкторію та інтенсивність хвиль, що проходять через них.

Історично такі матеріали, часто названі гіперболічними метаматеріалами (HMM), створювалися штучно, але їх також можна знайти і у природі. Це надає NZIM матеріалам значний потенціал для застосувань у фотоніці та термооптиці, оскільки вони дозволяють посилювати або пригнічувати теплове випромінювання в певних діапазонах частот.

Окрім підвищеного імпедансу, ENZ матеріали можуть діяти як поверхні з високим опором або штучні магнітні провідники. Це призводить до подвоєння сили тангенціальних електричних полів поблизу цих поверхонь, що підсилює взаємодію з надтонкими металевими плівками. Ця властивість дозволяє створювати вузькосмугові, але спектрально стабільні випромінювачі тепла, що мають стабільні лінії випромінювання і не потребують складних процесів нанофабрикації.

1.4.2 Збільшення довжини хвилі в ENZ матеріалах

В ENZ матеріалах довжина хвилі світла може значно зростати, що веде до унікальних оптичних явищ. Це збільшення довжини хвилі виникає через низьку групову швидкість світла в цих матеріалах, що сприяє тривалішій взаємодії світла з речовиною.

Зокрема, середовища з NZI здатні вибірково підсилювати випромінювання залежно від специфічних характеристик самого матеріалу, його розмірності та типу взаємодії випромінювача з середовищем. Наприклад, в 1D ENZ-середовищах було продемонстровано покращення процесів

фотолюмінесценції та катодолюмінесценції, що вказує на здатність таких середовищ підсилювати випромінювальні переходи, навіть у випадках, коли відсутні оптичні моди[9],[10].

Важливою особливістю є те, що збільшення довжини хвилі може зменшити вимоги до точності позиціонування квантових випромінювачів, що значно полегшує інтеграцію таких випромінювачів у різноманітні пристрої. Це дозволяє оптимізувати процеси, пов'язані зі спонтанним випромінюванням, зокрема для застосувань у квантовій оптиці та фотоніці.

Низька групова швидкість у ENZ матеріалах також відіграє важливу роль у нелінійних оптичних явищах, таких як модуляція показника заломлення та генерація гармонік. Прозорі провідні оксиди, які належать до класу ENZ матеріалів, демонструють значні переваги у телекомунікаційному спектральному діапазоні, де досягаються помітні покращення нелінійних явищ завдяки збільшеному часу взаємодії світла з матеріалом.

1.4.3 Повний інтерференційний контроль

NZIM-матеріали, а насамперед NZI для повного інтерференційного контролю над світлом. Це стало можливим завдяки таким матеріалам, які здатні впливати на фазу, амплітуду та напрямок поширення світла. NZIM-матеріали дозволяють управляти інтерференцією електромагнітних хвиль, тим самим забезпечуючи точний контроль над процесами, які раніше були недоступними для оптичного управління.

Однією з особливостей NZIM-матеріалів є можливість посилення нелінійних оптичних ефектів, таких як змішування частот і генерування гармонік. Це підвищення ефективності нелінійних процесів відкриває перспективи для нових фотонних пристроїв, де важливо налаштовувати і контролювати частотні комбінації світла. Наприклад, використання ENZ-матеріалів дозволяє посилювати ці ефекти, збільшуючи локальну густину фотонних станів і створюючи умови для точної взаємодії світла із середовищем[9].

Резонатори, інтегровані з NZIM-матеріалами, можуть ще більше підсилювати ці ефекти, збільшуючи локальну густину фотонних станів і налаштовуючи фазові співвідношення між хвилями. Це дозволяє створювати контрольовані резонансні умови, де електромагнітні хвилі можуть взаємодіяти таким чином, що досягається значне посилення або, навпаки, пригнічення певних частот або напрямків поширення хвиль. Наприклад, часове модулювання NZIM дає можливість змінювати параметри заломлення та дифракції в режимі реального часу.

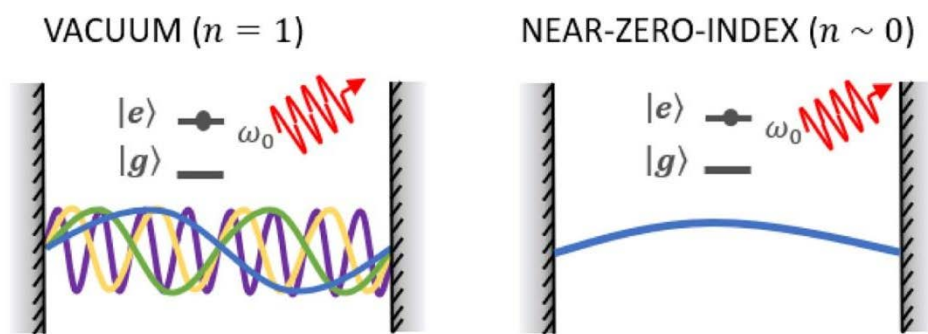


Рис 1.2 Схематичне зображення дворівневої системи $|e\rangle, |g\rangle$ з частотою переходу ω_0 , пов'язаної з континуумом фотонних мод у моделі віртуальної порожнини як у (ліворуч) вакуумі, так і (праворуч) у майже середовищі з нульовим індексом (NZI), яке пригнічує просторову щільність мод [9 с. 3]

1.5 Застосування NZIM в передових технологіях

NZIM мають значний потенціал для застосування в різних передових технологіях, зокрема:

1.5.1 Надшвидка оптика

NZIM, такі TCO, демонструють велику нелінійну оптичну відповідь, що робить їх гарним рішенням ультрашвидкого перемикання оптичних сигналів. Нові матеріали з розширеними можливостями взаємодії світло-матерія відіграють важливу роль у досягненні високих цілей нелінійної оптики. Нещодавно ENZ з'явилося як багатообіцяючий кандидат для покращення

кількох нелінійних процесів, включаючи модуляцію показника заломлення та генерацію гармонік.

Прозорі провідні оксиди як сімейство середовищ ENZ з майже нульовою діелектричною проникністю в ближньому інфрачервоному (телекомунікаційному) діапазоні зосереджені. Досліджено миттєву та запізнену нелінійності. Шляхом виявлення їх спільного походження від непараболічності зони показано, що їх відносна сила повністю визначається співвідношенням часу релаксації (або дефазування) енергії та імпульсу [4],[8].

Використовуючи цю структуру, матеріали ENZ порівнюються з багатьма перспективними нелінійними середовищами, які досліджуються в літературі, і показують, що, хоча матеріали ENZ радикально не випереджають міцність традиційних матеріалів у швидкій або повільній нелінійності, вони містять ключові переваги, такі як ідеальна час відгуку, власне покращення повільного світла та широкосмуговий характер у компактній платформі, що робить їх цінним інструментом для надшвидких фотонних додатків на десятиліття вперед.

1.5.2 Формування імпульсів

Завдяки низькій груповій швидкості світла в ENZ-матеріалах, їх можна використовувати для формування та керування оптичними імпульсами.

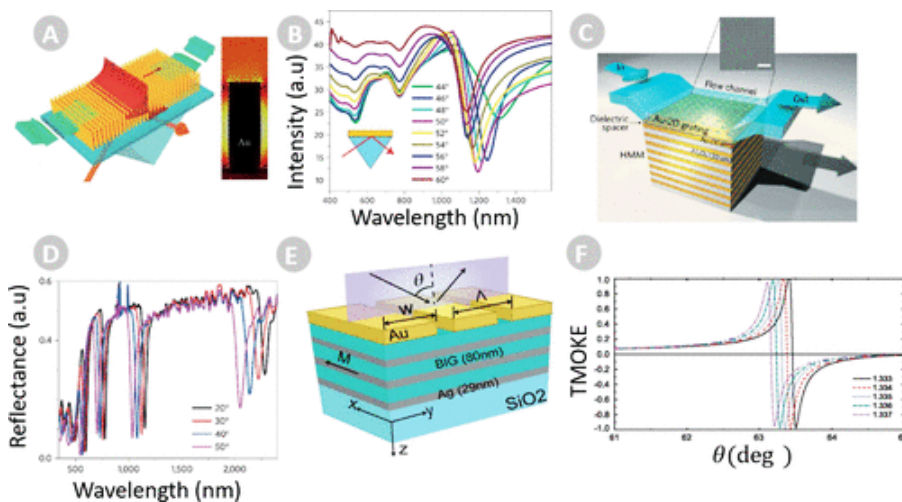


Рис. 1.3 . (а) Схема традиційної установки, подібної до Кречмана, для плазмонних нанострижневих біосенсорів НММ і (b) їхні відповідні криві відбиття для різних кутів падіння. Відтворено з дозволу посилання). (с) На вставці показано скануюче електронно-мікроскопічне зображення субхвильової золотої дифракційної решітки на верхній частині НММ. (d) Спектри відбиття для решітки-зв'язувача-НММ під різними кутами падіння. Відтворено з дозволу посилання. Синій зсув резонансних кутів у (b) і (d) зі збільшенням кута падіння демонструє, що режими VPP є керованими режимами. (е) Графічний вигляд МО-НММ, що містить діелектричні МО шари вісмут-залізного гранату (BIG) і Ag. (f) Фаноподібні криві ТМОКЕ для магнітоплазмонної структури в (е) при зміні показника заломлення суперстрати від 1,333 до 1,337. [9 с.7]

Рисунок 1.3 ілюструє обернену ефективну масу та її похідні, що відображають важливі характеристики ENZ матеріалів. На панелях а) та b) показані обернені ефективні маси, нормалізовані до m^{-1} , що допомагає зрозуміти, як електричне поле поляризує електрони в зоні провідності. У цьому контексті, варто звернути увагу на зв'язок між швидкими та повільними компонентами нелінійності, що було обговорено у вашій темі.

NZIM дають можливість для часового заломлення світла, що може бути використане для зміщення частоти оптичних сигналів та створення нових типів оптичних модуляторів. Цей аспект також пов'язаний з новими можливостями для генерації поляритонних пар із квантового вакууму через динамічний ефект Казимира, контролем над ступенями свободи заплутаності одиничних фотонів, а також посиленням спонтанного випромінювання вільних електронів.

1.5.3 Квантові комунікації

Матеріали NZIM здатні підвищити швидкість спонтанного випромінювання квантових випромінювачів, які знаходяться поблизу. Це

може суттєво підвищити ефективність квантових джерел світла та поліпшити зв'язок у квантових мережах. Середовища NZI мають значний вплив на квантові радіаційні переходи, включаючи спонтанне та стимульоване випромінювання, а також поглинання.

Швидкість радіаційних процесів зазвичай пов'язують із локальною щільністю оптичних станів (LDOS). Однак, оскільки стан NZI характеризується виснаженням простору оптичних мод, можна помилково вважати, що це середовище уповільнює всі радіаційні переходи, подібно до заборонених зон у фотонних кристалах. Ця інтуїція може бути оманливою, оскільки сила зв'язку також залежить від показника заломлення.

У межах нульового індексу можна спостерігати різноманітні нетривіальні радіаційні явища, які залежать від класу середовища NZI (ENZ, MNZ, EMNZ) і його ефективної розмірності (3D, 2D, 1D). Швидкість затухання спонтанного випромінювання Γ_s , нормалізована до відповідного значення у вільному просторі Γ_0 , масштабується за певною формулою[11],[9]:

$$PF = \frac{\Gamma_s}{\Gamma_0} = Z(\omega)|n^{D-1}(\omega)| \quad (1.4)$$

PF — Фактор Парселла.

Якщо $PF > 1$, середовище посилює спонтанне випромінювання.

Якщо $PF < 1$, середовище пригнічує спонтанне випромінювання.

Γ_s — швидкість спонтанного випромінювання в середовищі

Γ_0 — швидкість спонтанного випромінювання у вільному просторі

$Z(\omega)$ — модуль імпедансу середовища на частоті ω .

$|n(\omega)|$ — модуль показника заломлення $n(\omega)$ на частоті ω .

D — ефективна розмірність середовища.

$|n(\omega)|^{(D-1)}$ — це величина, що підсилює показник заломлення.

Унікальні характеристики NZIM, такі як низька групова швидкість і висока локальна густина фотонних станів (LDOS), для маніпулювання фотонною запутаністю, яка є важливим ресурсом у квантових комунікаціях. Дослідження допуску обмеження моди до зміни діелектричної проникності в

оболонці та сердцевині показують, що хвилеводи на основі ENZ можуть підтримувати обмежену оптичну моду навіть за незначної різниці діелектричної проникності.

Зокрема, в хвилеводі на основі ENZ, коли оболонка варіюється від $\epsilon_2 = -0.30$ до 0.30 , зберігається високий коефіцієнт заповнення $f (> 95\%)$, подібно до звичайного хвилевода з незначними змінами в ϵ_1 . Таку ж поведінку можна спостерігати й у прямокутному оптичному хвилеводі зі змінною діелектричною проникністю. Зміна геометрії хвилеводу може бути реалізована експериментально через методи осадження зверху вниз і літографії, причому високий коефіцієнт заповнення зберігається навіть за збільшення оптичних втрат у системі ENZ.

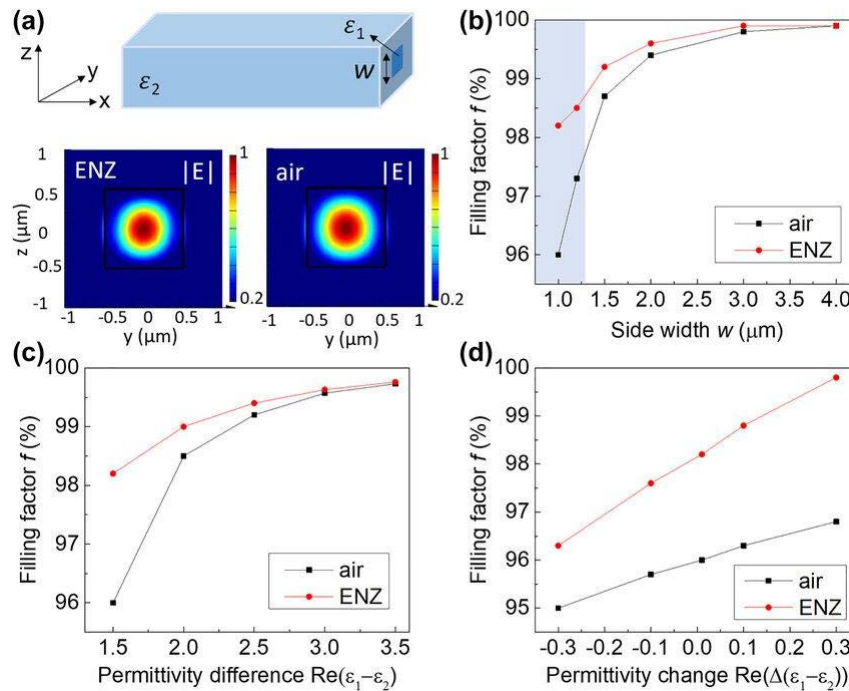


Рис. 1.4 Обмеження моди та коефіцієнт заповнення в оптичному хвилеводі на основі ENZ. (а) Схема тривимірного квадратного хвилеводу з діелектричним сердечником і відповідним профілем моди при поперечній електричній (TE) поляризації. Електричне поле є більш обмеженим у режимі ядра в оточенні середовища ENZ ($\epsilon_1 = 2,25$, $\epsilon_2 = 0,001 + 0,01i$) порівняно з повітряним середовищем ($\epsilon_1 = 2,25$, $\epsilon_2 = 1$). Уздовж осі x для хвилеводу на основі ENZ з'являється менший витік моди через непостійні хвилі. Ширина сторони

хвильоводу $w = 1$ мкм. (b) Коефіцієнт заповнення моди f хвильоводу на основі ENZ вищий, ніж у діелектричного хвильоводу, особливо для довжин сторін хвильоводу на субхвильових шкалах ($w < \lambda = 1,3$ мкм, заштрихована область). Діелектрична проникність становить $\varepsilon_1 = 3,24$ і $\varepsilon_2 = 1$ для повітряного хвильоводу, і $\varepsilon_1 = 2,25$ і $\varepsilon_2 = 0,001 + 0,01i$ для хвильоводу на основі ENZ. (c) Коефіцієнт заповнення моди хвильоводу на основі ENZ вищий, ніж у діелектричного хвильоводу, особливо коли контраст діелектричної проникності малий ($\text{Re}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) < 2$) між оболонкою та областю серцевини. Тут ε_1 змінюється, а ε_2 є фіксованим для обох систем ($\varepsilon_2 = 0,001 + 0,01i$ і $\varepsilon_2 = 1$ відповідно). (d) Коефіцієнт заповнення моди f дуже толерантний до зміни дійсної частини діелектричної проникності в шарі оболонки. Тут ε_1 є фіксованим, а ε_2 змінюється для системи ENZ ($\varepsilon_2 = -0,3 + 0,01i$ до $0,3 + 0,01i$), і навпаки для повітряного випадку ($\varepsilon_1 = 2,9$ до $3,5$). Довжина хвилі графіка становить $\lambda = 1,3$ мкм для всіх. Ширина сторони серцевини квадратної форми $w = 1$ мкм. [10 с. 3]

1.5.4 Лазери з надвисокою спрямованістю

Матеріали NZIM можуть бути застосовані для виготовлення оптичних хвильоводів, що мають наднизьку розбіжність променя. Це відкриває можливості для створення лазерів з надвисокою спрямованістю, які можуть бути корисні в таких сферах, як дальномірні прилади, лідари та оптичний зв'язок. Використання NZIM може підвищити коефіцієнт підсилення в лазерних середовищах, що, в свою чергу, призведе до розробки більш ефективних лазерів.

NZIM здатні зменшувати рівень шуму в оптичних системах завдяки поглинанню розсіяного світла. Гладкі поверхні матеріалів NZIM можуть знижувати розсіювання світла, що позитивно вплине на характеристики оптичних пристроїв.

1.6 Дослідження електромагнітних властивостей в різних діапазонах хвиль

1.6.1 Вузькосмугові збудження, спрямовані на моди LO фононів

Вузькосмугові збудження, спрямовані на моди поздовжніх оптичних (LO) фононів, відкривають унікальні можливості для впливу на властивості матеріалів завдяки їхньому тісному зв'язку з режимом ENZ. LO фонони, які є коливаннями атомів уздовж напрямку поширення хвилі в кристалічній решітці, відіграють важливу роль у взаємодії світла з матеріалами, зокрема в полярних твердих тілах, де вони розділяються на LO і TO (поперечні оптичні) моди. ENZ режим проявляється на частотах, де діелектрична проникність матеріалу наближається до нуля. Цей режим забезпечує підвищення локальної інтенсивності електричного поля та зниження групової швидкості, що сприяє посиленій взаємодії світла з фононними модами і, зокрема, із LO фононами. Вузькосмугові збудження, налаштовані на резонансні частоти LO фононів, дозволяють досягти сильного резонансного збудження цих мод, що може призвести до посиленого збудження фононних коливань. Це збудження може викликати значний вплив на властивості матеріалів, включаючи магнітні й електричні характеристики, а також впливати на спонтанну намагніченість і зміщення доменних стінок у магнітних матеріалах.

Дослідження [5],[13] показують, що вплив вузькосмугових ІЧ-імпульсів, налаштованих на частоти LO фононів, є особливо потужним при використанні надзвичайно вузькоспектральних імпульсів, що дозволяє досягти ефектів, яких важко досягти у випадку поперечних оптичних мод. Наприклад, у легованих діелектричних плівках спонтанна намагніченість може стійко перемикатися за рахунок таких імпульсів, і цей ефект добре масштабується з популяцією LO фононних мод. Така резонансна взаємодія дозволяє маніпулювати структурними і магнітними характеристиками матеріалу, відкриваючи перспективи для створення нових фотонних пристроїв з контрольованими властивостями.

1.6.2 Гіперболічні метаматеріали (НММ):

Гіперболічні метаматеріали (НММ) є інженерними структурами, які завдяки особливій анізотропії діелектричної проникності демонструють унікальні оптичні властивості. Основною відмінністю НММ є їхня гіперболічна дисперсія, де діелектрична проникність має різні знаки вздовж різних осей. Це призводить до гіперболічної форми ізочастотної поверхні, що забезпечує унікальну поведінку світла, зокрема підтримку гіперболічних поляритонів — електромагнітних хвиль із високою локалізацією поля та великим хвильовим вектором. Гіперболічна дисперсія дозволяє НММ значно підсилювати ефекти взаємодії світла з матеріалом, а також налаштовувати їх оптичні властивості шляхом зміни геометрії або матеріалів у наноструктурах, з яких вони складаються.

Застосування НММ охоплює широкий спектр галузей в оптиці та фотоніці, зокрема: контроль теплового випромінювання, що є корисним для термоелектричних і тепломаскувальних пристроїв; підсилення нелінійних оптичних ефектів, таких як генерація гармонік, що відкривають нові варіанти для створення компактних нелінійних пристроїв; створення надчутливих сенсорів завдяки високій локалізації поля і чутливості до змін у середовищі; і навіть розробку суперлінз, здатних долати дифракційний ліміт та забезпечувати зображення із роздільною здатністю, вищою за довжину хвилі світла.

1.6.3 Видимий та ІЧ діапазони

ENZ матеріали мають особливі оптичні властивості, що дозволяє керувати світловими потоками, посилювати нелінійні ефекти і створювати інноваційні оптичні пристрої для видимого та інфрачервоного (ІЧ) спектрів. Наприклад, TCO, як-от оксид індію-олова (ITO), є поширеними ENZ матеріалами, які демонструють ENZ режим у видимому та ближньому ІЧ діапазонах завдяки високій концентрації носіїв заряду[8]. Це забезпечує їм унікальні властивості, зокрема значне підсилення нелінійних явищ, таких як

генерація гармонік і модуляція фази. У деяких металах, як-от срібло, ENZ ефект також спостерігається в видимому діапазоні, що дозволяє маніпулювати світлом на нанорівні. Крім того, інші матеріали, такі як нітрид титану (TiN) і нітрид цирконію (ZrN), досягають ENZ режиму в ІЧ діапазоні і витримують високі температури, що робить їх перспективними для термоелектричних застосувань.

Частоту, при якій досягається ENZ режим, можна регулювати, змінюючи концентрацію носіїв заряду, що дозволяє точно налаштовувати її до необхідного спектрального діапазону — видимого чи ІЧ. ENZ частота також залежить від температури, що є можливістю для контролю за властивостями матеріалу в динамічних умовах. Крім того, в режимі ENZ посилюються нелінійні оптичні ефекти, такі як модуляція фази і генерація гармонік, що робить можливим створення компактних та ефективних оптичних приладів.

1.7 Застосування NZIM в поєднанні з резонаторними структурами

1.7.1 Біомедичні дослідження

NZIM та НММ відкривають нові можливості для біомедичних досліджень, особливо у сенсориці, терапії та зображенні. Їх оптичні властивості, такі як висока чутливість до змін показника заломлення та здатність до локалізації електромагнітного поля, роблять їх вигідним рішенням для різних біомедичних застосувань. У сенсориці, наприклад, гіперболічні метаматеріали можуть реагувати на мінімальні зміни показника заломлення, що дозволяє з високою точністю виявляти біомолекули. Плазмонні наноструктури з гіперболічною дисперсією, такі як нанострижні, забезпечують високу чутливість, необхідну для виявлення біомолекул. Проте, для таких систем часто потрібні призмові з'єднання (наприклад, конфігурація Кречмана), що створює певні обмеження на мініатюризацію сенсорних пристроїв.

У терапевтичних застосуваннях нульові індексні матеріали здатні підвищувати локальне тепловиділення, що є корисним для цільової терапії.

Наприклад, плазмонні метаструктури, які функціоналізовані NZIM, можуть спрямовувати тепловий вплив саме на необхідні ділянки біологічної тканини, що робить їх ефективними для гіпертермії або локального нагрівання.

В області біомедичного зображення NZIM дозволяють досягати надвисокої роздільної здатності, що перевершує можливості традиційних оптичних систем. Наприклад, фотонні архітектури на основі графену в комбінації з NZIM підходять для надшвидкого електрооптичного перемикавання і здатні генерувати зображення з високою деталізацією, що особливо цінно для мікроскопії та інших методів візуалізації в медицині

1.7.2 Антенні системи

NZIM забезпечують рівномірний розподіл фази завдяки своїй специфічній електродинамічній природі: всередині них ефективна довжина хвилі стає надзвичайно великою, фазова швидкість наближається до швидкості світла у вакуумі, тоді як хвильовий вектор прагне до нуля. Це дозволяє створювати компактні антени з високим коефіцієнтом підсилення. У таких метаматеріалах також можна керувати діаграмою спрямованості, що робить їх багатообіцяючими для забезпечення чіткої направленості і зменшення небажаних перешкод.

ENZ матеріали, що входять до групи NZIM, мають потенціал для значного зменшення розмірів антен, оскільки довжина хвилі електромагнітних хвиль у таких матеріалах набагато коротша, ніж у звичайному середовищі. Це дає змогу створювати пристрої, зменшені в рази, які можуть виконувати ті самі функції, що й традиційні антени. Такі матеріали легко інтегруються з іншими електронними і оптичними елементами, що дозволяє будувати більш компактні та функціональні системи.

Утім, існують певні виклики в реалізації антен на основі ENZ. Наприклад, такі матеріали часто мають значні втрати, що може негативно позначатися на ефективності антен. Також технологічний процес

виготовлення та інтеграції NZIM в антени вимагає високої точності, що робить його досить складним з інженерної точки зору.

1.7.3 Комунікаційні системи

NZIM володіють великим потенціалом у розробці сучасних комунікаційних систем. Ці властивості сприяють створенню надшвидких оптичних перемикачів, які забезпечують миттєве налаштування характеристик сигналу. Таким чином, NZIM можуть бути інтегровані у повністю оптичні логічні пристрої, здатні здійснювати комутацію на терагерцових частотах, що значно перевершує можливості традиційних систем, що потребують електричного керування.

Використання NZIM у нелінійній модуляції індексу для реалізації оптичних модуляторів і перемикачів, здатних працювати на телекомунікаційних довжинах хвиль. Наприклад, легований алюмінієм оксид цинку (ZnO) демонструє високу швидкість передачі даних, що може суттєво зменшити затримку та енергоспоживання. Це особливо важливо для оптимізації мереж Інтернету речей (IoT) та мобільних технологій наступного покоління. Дослідження також свідчать, що ENZ матеріали можуть бути інтегровані з оптичними волокнами, що покращить характеристики існуючих мереж.

NZIM дозволяють не лише зменшити розміри компонентів, але й підвищити якість передачі завдяки кращому керуванню напрямком сигналу та поляризацією. Це зменшує перешкоди і підвищує безпеку передачі даних. Впровадження таких матеріалів у системи комунікацій також надає можливість динамічно керувати діаграмою спрямованості антен та розширювати їх робочий діапазон частот.

Основні напрямки застосування

1. *Надшвидке перемикання:* NZIM демонструють значну нелінійну оптичну відповідь, для оптичного перемикання. Ця технологія вже реалізована в таких пристроях, як дзеркала з можливістю насичення,

лазерні захисні окуляри та бістабільні пристрої. Завдяки здатності швидкого налаштування характеристик сигналу NZIM можуть використовуватися для розробки повністю оптичних логічних пристроїв, здатних виконувати комутацію на терагерцових частотах.

2. *Керування випромінюванням:* NZIM у поєднанні з резонаторними структурами можуть точно контролювати випромінювання електромагнітних хвиль, що підвищує ефективність і спрямованість антен, а також оптимізує характеристики передачі сигналів. Квантові радіаційні переходи в середовищах NZI мають нетривіальний вплив на спонтанне і стимульоване випромінювання, а також на поглинання.
3. *Перетворення частоти:* NZIM можуть бути використані для перетворення частоти оптичних сигналів, що може стати основою для нових оптичних комунікаційних технологій. Дослідження показали можливість адіабатичного перетворення частоти за допомогою метаповерхні, що змінюється в часі, на основі ENZ матеріалів. Це дозволяє також розробляти технології для широкосмугового перетворення частоти з використанням часового заломлення.

Таким чином, NZIM є перспективними матеріалами для розвитку нових технологій у комунікаційних системах. Їхня здатність до надшвидкого перемикавання, точного контролю випромінювання та перетворення частоти. Однак для повноцінної реалізації таких систем необхідні подальші дослідження щодо сумісності NZIM з існуючими технологіями, а також розробка ефективних методів інтеграції. Важливо також врахувати економічну ефективність використання цих матеріалів у промислових масштабах для підтвердження їх практичної придатності.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ОПИС СЕРЕДОВИЩА

Перш ніж перейти до моделювання, докладно опишемо задачу яку розглядаємо. У статті [1] надано теоретичний аналіз задачі о коливаннях електромагнітного поля в резонаторі з ідеально провідними стінками, що

заповнений дисперсійним середовищем, відповідно, його діелектрична та магнітна проникності залежать від частоти. Завдяки цим властивостям, показник заломлення середовища в певному діапазоні частот має значення наближені до нуля. Середовище є однорідним і ізотропним. Дослідження проведено у часовій області і не розглядає просторовий розподіл електромагнітних полів.

Дисперсійні явища зазвичай аналізуються в частотній області. За наявності дисперсійних властивостей показник заломлення середовища може наближатися до нуля, якщо ефективна діелектрична проникність $\epsilon(\omega)$, магнітна проникність $\mu(\omega)$ або обидва параметри мають значення, близькі до нуля.

На цій основі NZI-матеріали (near-zero-index materials) класифікуються на три типи, як вже було докладно розглянуто в огляді: ENZ (epsilon-near-zero): матеріали з діелектричною проникністю, близькою до нуля, за умови ненульової магнітної проникності. MNZ (mu-near-zero): матеріали з магнітною проникністю, близькою до нуля, за умови ненульової діелектричної проникності. EMNZ (epsilon-and-mu-near-zero): матеріали, де обидві проникності одночасно наближаються до нуля.

Кожен тип має свої особливості і властивості, але стаття [1] використовує у якості заповнення резонатора модель останнього типу середовища, EMNZ, яке має кінцеве значення ефективного хвильового імпедансу середовища $Z = \sqrt{\mu/\epsilon}$, на відміну від ENZ ($Z = \infty$) та MNZ ($Z = 0$).

Змодельовати таку поведінку властивостей середовища можливо за допомогою полюсів Друде, які описують діелектричну та магнітну проникності у частотній області [1].

$$\begin{aligned}\epsilon_{eff}(\omega) &= 1 + \frac{\chi_e \omega_e^2}{i\omega(i\omega + \gamma_e)} \\ \mu_{eff}(\omega) &= 1 + \frac{\chi_e \omega_h^2}{i\omega(i\omega + \gamma_h)}\end{aligned}\tag{2.1}$$

$$n_{eff}(\omega) = \sqrt{\varepsilon_{eff}(\omega)\mu_{eff}(\omega)}$$

де ω_e , ω_h – характеристичні кругові частоти середовища, γ_e , γ_h – коефіцієнти втрат, а χ_e , χ_h – амплітуди полюсів. У часовій області ці параметри відповідають диференціальним рівнянням другого порядку для векторів поляризації та намагніченості [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathcal{P}(\mathbf{r}, t) + \gamma_e \frac{\partial}{\partial t} \mathcal{P}(\mathbf{r}, t) &= \chi_e \omega_e^2 \mathcal{E}(\mathbf{r}, t), \\ \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathcal{M}(\mathbf{r}, t) + \gamma_h \frac{\partial}{\partial t} \mathcal{M}(\mathbf{r}, t) &= \chi_h \omega_h^2 \mathcal{H}(\mathbf{r}, t). \end{aligned} \quad (2.2)$$

Для випадку, що розглядається статті [1] і відповідає дисперсії Дірака, параметри електричного і магнітного полюсів однакові, $\gamma_e = \gamma_h = \gamma$, $\omega_e = \omega_h = \omega_p$ — плазмова частота електронів провідності середовища, $\chi_e = \chi_h = \chi$.

Важливо зазначити, що полюсна модель Друде для діелектричної проникності відповідає наявності електропровідності у матеріалі. Проте для магнітної проникності така відповідність у природі не існує, що робить середовище штучним. Опис моделі є узагальненим і не торкається деталей обміну імпульсом усередині таких матеріалів, але забезпечує достатньо повне розуміння процесів, які відбуваються.

У статті не було проаналізовано просторовий розподіл поля і який вплив середовище здійснює чи, навпаки, не здійснює, на нього. У даній роботі ми змоделюємо ситуацію за допомогою пакета COMSOL Multiphysics. Ми маємо резонатор з ідеально провідними стінками, який заповнено середовищем, описаним у статті [1] як середовище I, з плазмовою частотою $f_p = \omega_p/2\pi = 25.09$ ГГц, коефіцієнтом втрат $\gamma = 10^{-3} f_p = 2.5 \cdot 10^7$ с⁻¹.

3. СИМУЛЯЦІЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ПАКЕТУ COMSOL MULTIPHYSICS

3.1 Моделювання за допомогою COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics — потужний інструмент для моделювання фізичних процесів, який дозволяє досліджувати складні системи за допомогою мультифізичного підходу. Унікальність програми полягає в її здатності одночасно аналізувати взаємодію кількох фізичних процесів через інтуїтивний інтерфейс та точне чисельне моделювання методом скінченних елементів.

Програма підтримує дво- та тривимірне моделювання, дозволяючи відтворювати геометрично складні об'єкти та точно аналізувати реальні фізичні системи. Візуалізація результатів у вигляді графіків, анімацій та інших форматів допомагає легко інтерпретувати навіть найскладніші взаємодії.

Потужний параметричний аналіз надає змогу швидко змінювати вхідні параметри — від геометричних розмірів до граничних умов — та миттєво оцінювати їхній вплив на кінцевий результат. Це особливо корисно для оптимізації інженерних рішень, адже дослідник може швидко знайти найефективніше рішення для конкретної задачі.

Гнучкість COMSOL виявляється у можливості створювати геометрії будь-якої складності, задавати унікальні матеріальні властивості (включно з анізотропними та температурнозалежними характеристиками) та визначати точні граничні умови. Такий підхід забезпечує максимально реалістичне моделювання реальних систем з високою точністю. Реалізований метод скінченних елементів (FEM) дає змогу виконувати високоточні обчислення навіть для надскладних нелінійних задач. Програма легко опрацьовує моделі з нелінійними деформаціями матеріалів, дозволяючи проводити динамічний та спектральний аналіз, зокрема вивчати власні частоти й форми коливань механічних або електромагнітних систем. Всі ці фактори перетворюють моделювання складних фізичних систем на швидкий і ефективний процес, даючи змогу обробляти великі моделі з мінімальними часовими затратами.

COMSOL Multiphysics, зокрема його RF Module, є потужним інструментом для дослідження електромагнітних структур, таких як резонатори, хвилеводи та антени. Цей модуль дозволяє аналізувати спектральні характеристики систем, включаючи резонансні частоти та добротність. Завдяки точним чисельним розрахункам можна вивчати розподіл електромагнітних полів, що допомагає у проєктуванні пристроїв із заданими параметрами, наприклад, для поліпшення ефективності антени або мінімізації втрат у хвилеводі.

Для визначення власних частот та мод у COMSOL використовується функція Eigenfrequency Study. Вона дозволяє проводити точний аналіз коливальних процесів у системі, наприклад, в електромагнітних або механічних резонаторах. Завдяки цьому користувачі можуть налаштувати геометрію та матеріали, щоб оптимізувати параметри структури для досягнення бажаних характеристик.

Окрім розрахунків, COMSOL пропонує зручні інструменти для візуалізації. Результати можна відобразити у вигляді мод деформацій для механічних систем або розподілу електромагнітного поля для резонаторів. Це не лише допомагає краще зрозуміти поведінку системи, але й дозволяє вдосконалювати конструкції для досягнення максимальної ефективності.

Саме тому для глибокого дослідження електромагнітних характеристик постає важливим моделювання порожнього прямокутного резонатора з метою аналізу його роботи, визначення власних частот та вивчення характеристик електромагнітного поля для однієї з мод резонатора.

Метою моделювання є аналіз роботи прямокутного резонатора, визначення його власних частот, а також характеристик електромагнітного поля для основної моди резонатора TE_{101} .

3.2 Власні режими резонатора, який заповнено середовищем без дисперсії

Вивчення власних режимів починаємо з *пустого резонатора*. Прямокутний резонатор повністю оточений ідеально провідними стінками, які

забезпечують повне відбиття електромагнітного поля. Простір всередині резонатора заповнений повітрям із такими фізичними характеристиками: $\sigma = 0$, $\mu_r = 1$, $\epsilon_r = 1$

Для проведення моделювання в COMSOL Multiphysics було використано фізичний інтерфейс Electromagnetic Waves, Frequency Domain, що дозволяє виконувати розрахунки у частотній області. У рамках задачі було обрано тип дослідження Eigenfrequency Study, що передбачає пошук власних частот. Граничні умови для всіх стінок резонатора задаються як PEC (Perfect Electric Conductor), що моделює ідеально провідні поверхні.

Фізичний розподіл мод електричного поля можна підтвердити аналітичним обчисленням власних частот за формулою для прямокутного резонатора:

$$f_{mnp} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{l}\right)^2 + \left(\frac{n}{h}\right)^2 + \left(\frac{p}{w}\right)^2} \quad (3.1)$$

де m, n, p — індекси мод, що визначають кількість хвиль у кожному напрямку, l, w, h — глибина, ширина, висота резонатора, відповідно, c — швидкість світла у вакуумі.

У моделі використано метод зміщених власних значень (Shifted Eigenvalue), що забезпечує точний пошук частот у вибраному діапазоні. Ми шукаємо основну моду, TE₁₀₁, і орієнтуємо резонатор таким чином, що вздовж осей X та Z є ширина та глибина резонатора, а вздовж вісі Y — його висота. Оскільки власні частоти суттєво залежать від геометричних параметрів резонатора обрано 5 розмірів, які зменшуються, для дослідження. Висота обрана $h = 0.0102$ м, і не змінюється. Ми змінюємо одночасно глибину та ширину резонатора, які ми обрали однаковими, рис. 3.1.

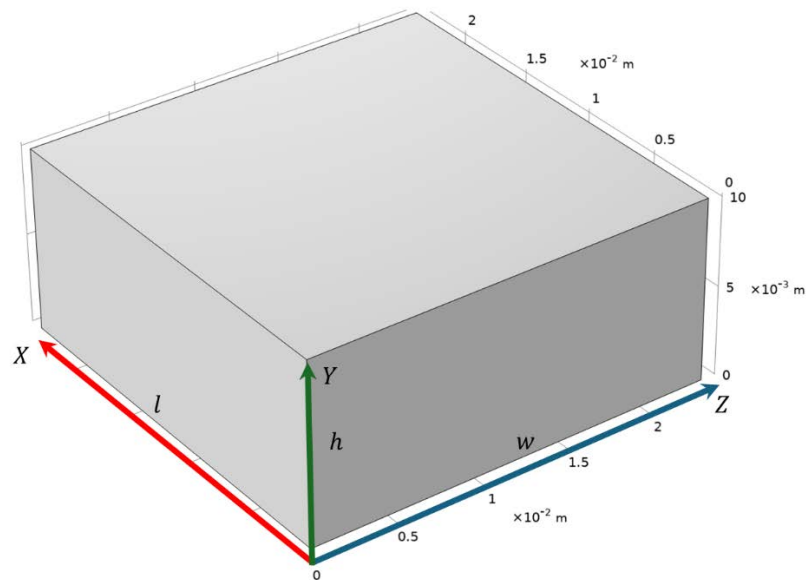


Рис. 3.1 Геометрія задачі

Параметри проєкта містять розміри резонатора та аналітичне значення частоти моди TE_{101} , обрахованої аналітично за формулою (3.1). Один з найважливіших параметрів симуляції з пошуку власних частот, є початкове значення, біля якого шукається розв'язок відповідних диференціальних рівнянь. Аналітичне значення частоти моди використовувалося як початкове. Для порожнього резонатора початкову частоту було встановлено 9 ГГц (випадок 1-2, см таблицю) та 10 ГГц (випадок 3-5). Середовище для заповнення було обрано вбудоване, яке відповідає повітрю, рис. 3.2. Також задавався пошук кількох власних значень задачі (10), та обиралися за найбільшою дійсною частиною, щоб уникнути близько нульових розв'язків. Сітка контролювалася фізикою розглядання.

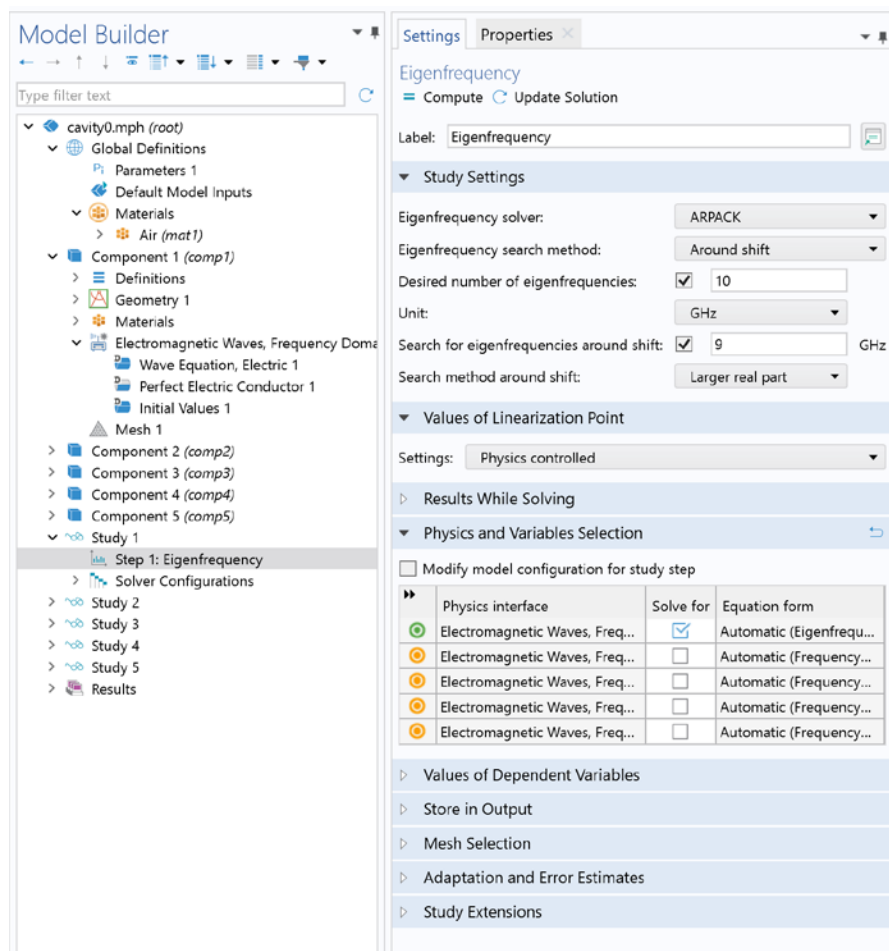


Рис. 3.2 Налаштування вирішувача.

Таблиця 3.1. Власні параметри порожнього прямокутного резонатора для різних геометричних розмірів.

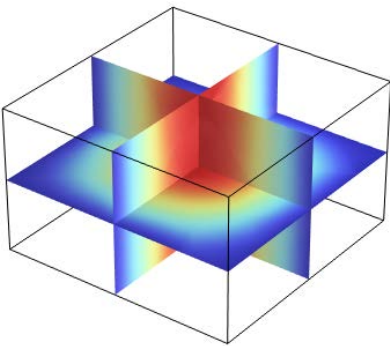
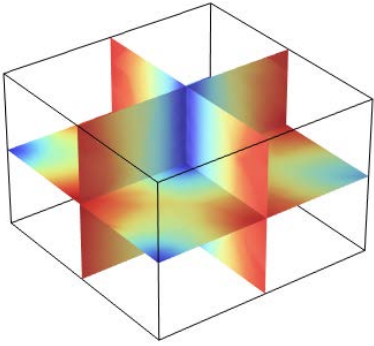
	Ширина, глибина $l = w$, м	Обчислена частота, ГГц	Розподіл електричного поля, $norm(E)$, В/м	Розподіл магнітного поля, $norm(H)$, А/м
1	0.023	9.217		
2	0.021	10.097		
3	0.019	11.158		
4	0.017	12.468		
5	0.015	14.14		

Загальний вигляд розподілу електричного та магнітного поля зберігаються для кожного розміру резонатора. Амплітуда електричного поля досягає максимуму в центральній частині резонатора та поступово

зменшується поблизу його стінок. Характер розподілу і відсутність виродження (відповідність одному значенню частоти кількох просторових розподілів поля) свідчить, що ми дійсно отримали частоту та розподіл поля основної моди прямокутного резонатора TE_{101} . Добре видно, що, як і очікувалося, зі зменшенням ширини та глибини резонатора власна частота моди зростає.

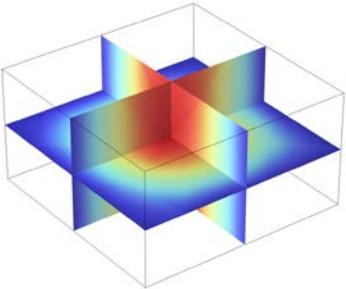
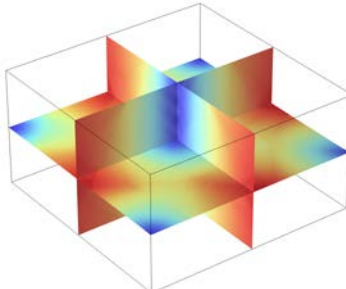
Наступними є два допоміжних приклади, коли резонатор заповнений середовищем без дисперсії, з діелектричною проникністю $\varepsilon_r = 1 + \chi = 2$, (2.1), та магнітною проникністю $\mu_r = 1 + \chi = 2$, без втрат (Табл. 3.2), та з втратами (Табл. 3.3), які приблизно відповідають параметрам моделі середовища I [1] без урахування дисперсії. Для такої симуляції в проєкті створено нове середовище, зі вказаними фізичними властивостями, та середовищу було призначено електропровідність $\sigma = 3.5 \times 10^{-3}$ См/м. Оскільки характер просторового розподілу поля є схожим для всіх розмірів резонаторів, і добре відомим, то його наведено тільки один раз.

Таблиця 3.2. Власні параметри прямокутного резонатора заповненого матеріалом без втрат і без дисперсії, $\varepsilon_r = \mu_r = 2$, для різних геометричних розмірів.

Ширина, глибина, $l = w$, м	Обчислена частота, ГГц	Розподіл електричного поля, $norm(E)$, В/м	Розподіл магнітного поля, $norm(H)$, А/м
0.023	4.61		
0.021	5.05		
0.019	5.58		
0.017	6.24		
0.015	7.07		

Як добре відомо, і саме таку картину представило моделювання, зі збільшенням величини діелектричної магнітної проникності електричний розмір резонатора збільшився і, відповідно, власна частота відповідної моди зменшилася. У випадку середовища зі втратами, власні частоти мають уявну частину, яка відповідає наявності втрат, а дійсна частина, за обчисленням, не змінилася. Тобто використана провідність дає дуже малий вплив на дійсну частину власної частоти, який в наведеному прикладі не був зареєстрований під час чисельного моделювання.

Таблиця 3.3. Власні параметри прямокутного резонатора заповненого матеріалом $\epsilon_r = \mu_r = 2$, $\sigma = 3.5 \times 10^{-3}$ См/м для різних геометричних розмірів.

Ширина, глибина, $w = l$, м	Обчислена частота, ГГц	Розподіл електричного поля, $norm(E)$, В/м	Розподіл магнітного поля, $norm(H)$, А/м
0.023	$4.61 + 0.016i$		
0.021	$5.05 + 0.016i$		
0.019	$5.58 + 0.016i$		
0.017	$6.24 + 0.016i$		
0.015	$7.07 + 0.016i$		

3.3 Власні режими резонатора, який заповнено середовищем з дисперсією

Для моделювання власних режимів резонатора, який заповнений середовищем з дисперсією, ми використали модель наведену в (2.1), і порахували діелектричну та магнітну проникність у діапазоні частот від 0.01 ГГц до 100 ГГц, з параметрами моделі: частота $f_{p1} = \frac{\omega_{p1}}{2\pi} = 25.09$ ГГц, коефіцієнт втрат $\gamma_1 = 10^{-3} \omega_{p1} = 15.76 \cdot 10^7$ с⁻¹, рис. 3.4. Ці обраховані дані використали для нового матеріалу, який заповнює резонатор. Також, перш ніж обчислювати власні частоти додали до Study попередній крок Frequency domain, в якому вказали діапазон частот що розглядається.

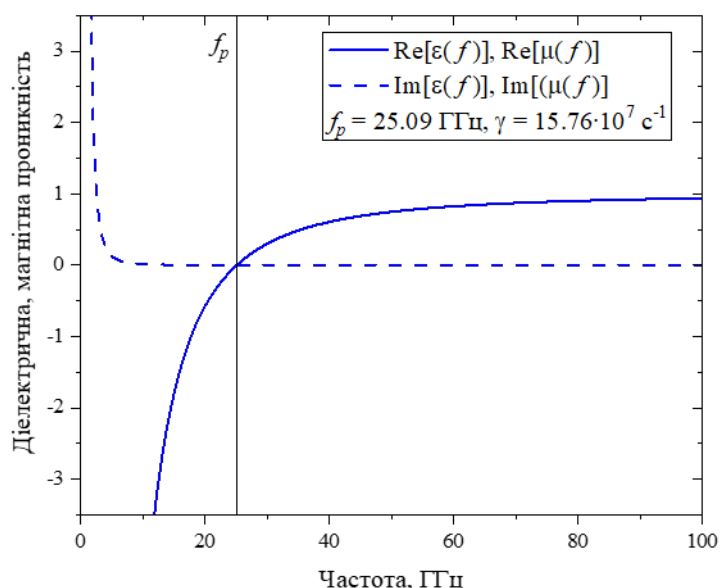
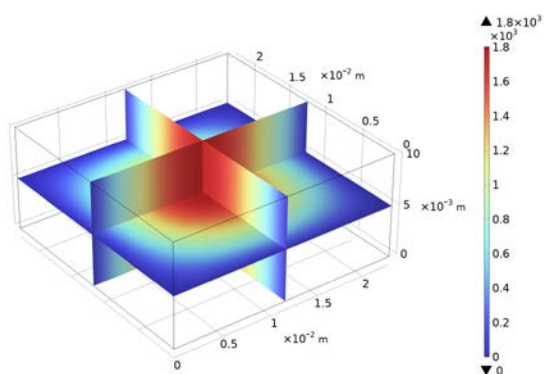


Рис. 3.3 Залежність діелектричної та магнітної проникності середовища, що заповнює резонатор, від частоти

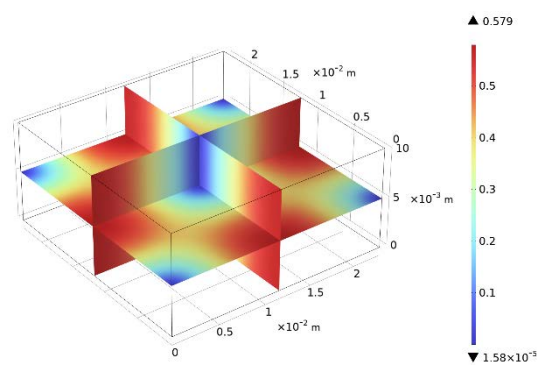
Отримані розподіли полів представлені на рис. 3.4. а власні частоти у табл. 3.4. залежно від розміру резонатора. Також наведено для порівняння дані власних частот порожнього резонатора. Інтенсивність полів, порівняно з полями в пустому резонаторі, електричного поля вище, а магнітного нижче. Зі зменшенням розміру резонатора, за результатами обчислень, інтенсивність як електричного, так і магнітного полів збільшується, чого не спостерігалось у попередньо розглянутих випадках пустого резонатора, або заповненого середовищем без дисперсії. Отримана дійсна частина частоти трохи більша за таку отриману для порожнього резонатора.

Ширина, глибина, $w = l$, м	Обчислена власна частота, ГГц (дисперсія)	Обчислена власна частота, ГГц (порожній резонатор)
0.023	$9.8360 - 0.00017i$	9.217
0.021	$10.773 - 0.00018i$	10.097
0.019	$11.907 - 0.0002i$	11.158
0.017	$13.307 - 0.00022i$	12.468
0.015	$15.082 - 0.00025i$	14.14

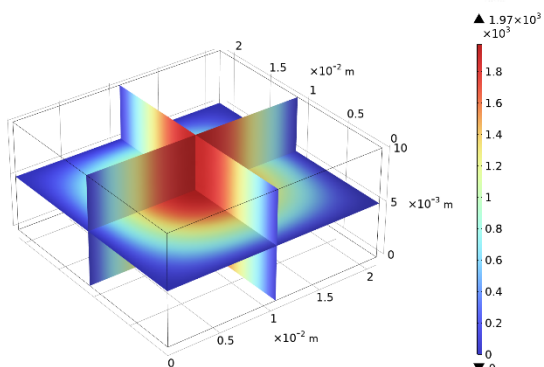
a



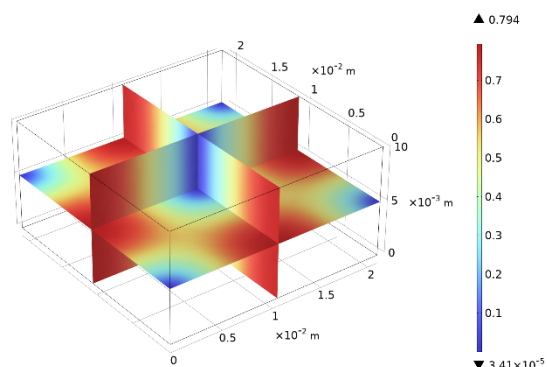
б



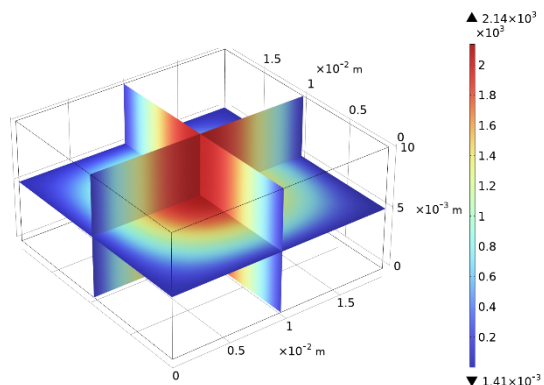
в



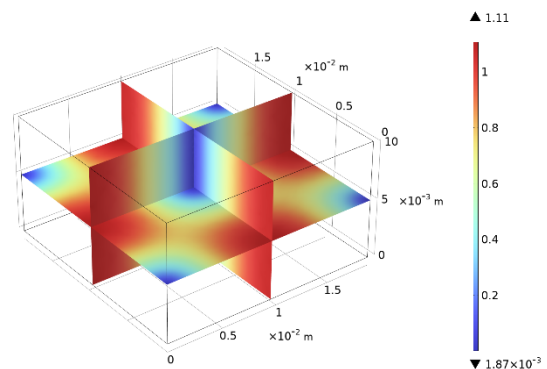
г



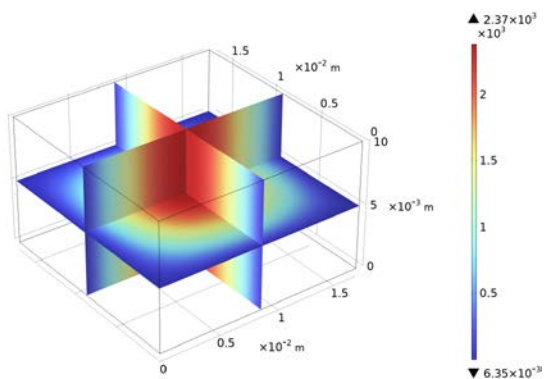
д



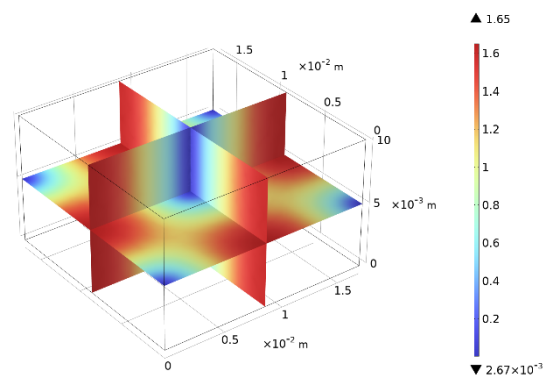
е



ж



з



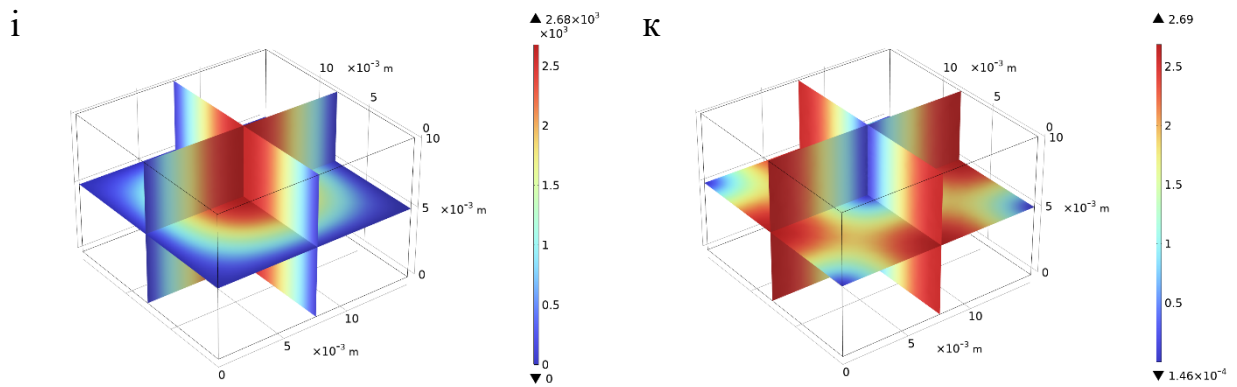


Рис.3.4 Просторовий розподіл полів моди TE_{101} в резонаторі, що заповнений матеріалом з дисперсією для різних розмірів резонаторів. Розподіл електричного поля, $norm(E)$, В/м, а) $l = w = 0.023$ м; в) $l = w = 0.021$ м; д) $l = w = 0.019$ м; ж) $l = w = 0.017$ м; і) $l = w = 0.015$ м). Розподіл магнітного поля, $norm(H)$, В/м, б) $l = w = 0.023$ м; г) $l = w = 0.021$ м; е) $l = w = 0.019$ м; з) $l = w = 0.017$ м; к) $l = w = 0.015$ м)

ВИСНОВОК

У результаті виконання кваліфікаційної роботи магістра на тему "Симуляція власних режимів об'ємного резонатора, який заповнений середовищем з показником заломлення близьким до нуля у певному діапазоні частот" було розглянуто просторовий розподіл основної моди прямокутного резонатора у випадку заповнення резонатора середовищем з дисперсією. Модель середовища було побудовано за допомогою полюсів Друде і показник заломлення такого середовища має над малі значення в певному діапазоні частот. Проведено комплексне дослідження властивостей матеріалів із майже нульовим показником заломлення (NZIM) та їх взаємодії з резонаторними структурами.

В кваліфікаційної роботи магістра проведено аналіз типів NZIM, таких як ENZ, MNZ та EMNZ, їх структурних властивостей, механізмів формування та методів отримання за літературними джерелами. Розглянуто дослідження в недавніх публікаціях особливості взаємодії NZIM із резонаторними структурами.

Проведено моделювання власних процесів у мікрохвильовому резонаторі з ідеально провідними стінками, заповненому середовищем із дисперсійними властивостями у програмному середовищі COMSOL Multiphysics® у частотній області, проведено пошук частот основної моди залежно від розміру резонатора. Моделювання підтвердило унікальні властивості середовища з показником заломлення близьким до нуля. Треба зазначити, що моделювання проходило в частотній області в рамках пошуку власних значень відповідної крайової задачі, але всю повноту унікальних властивостей середовища з показником заломлення близьким до нуля може виявити симуляція у часовій області, яка буде наступним кроком дослідження.

Практичне значення роботи полягає у демонстрації потенціалу використання NZIM для оптимізації мікрохвильових резонаторів, що може бути застосовано в сучасних технологіях, включаючи телекомунікаційні системи, лазерну техніку та сенсорні пристрої.

ЛІТЕРАТУРА

1. Антюфєєва М. С., Антюфєєв М. О., Батраков Д. О. Особливості збуджених полів у резонаторі, який заповнено середовищем з показником заломлення близьким до нуля // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка».. – Вип. 39. – у друку <https://periodicals.karazin.ua/radiophysics/issue/view/1411>
2. Antyufeyeva M. S., Butrym A. Y., Tretyakov O. A. Transient electromagnetic fields in a cavity with dispersive double negative medium // Progress In Electromagnetics Research M. 2009. Vol. 8. P. 51-65.
3. McCutcheon R. A., Ostermann S., Yelin S. F. Effect of photon propagation on a zero refractive index medium // Physics Department, University of Connecticut. 2024.
4. Dey S., Kirandas P. S., Nagar D. J., Mitra J. Epsilon near zero metal oxide based spectrally selective reflectors // School of Physics, Indian Institute of Science Education and Research Thiruvananthapuram, Kerala, India. 2024.

5. Davies C. S., Kirilyuk A. Epsilon-near-zero regime for ultrafast opto-spintronics // NPJ Spintronics. 2024. DOI: 10.1038/s44308-024-00025-4 [Epsilon-near-zero regime for ultrafast opto-spintronics | npj Spintronics](#)
6. Mahmoud A. M., Engheta N. Wave-matter interactions in epsilon-and-mu-near-zero structures. Nature Communications. 2014. Vol. 5. P. 5638. DOI: 10.1038/ncomms6638 [Wave-matter interactions in epsilon-and-mu-near-zero structures | Nature Communications](#)
7. Liberal I., Mahmoud A. M., Li Y., Edwards B., Engheta N. Photonic doping of epsilon-near-zero media. Science. 2017. Vol. 355. P. 1058-1062. DOI: 10.1126/science.aal2672 [Photonic doping of epsilon-near-zero media | Science](#)
8. Khurgin J. B., Clerici M., Kinsey N. Fast and Slow Nonlinearities in Epsilon-Near-Zero Materials. Laser & Photonics Reviews. 2023. Vol. 17. DOI: 10.1002/lpor.202200427 [Fast and Slow Nonlinearities in Epsilon-Near-Zero Materials - Khurgin - 2021 - Laser & Photonics Reviews - Wiley Online Library](#)
9. Lobet M., Kinsey N., Liberal I., Caglayan H., Huidobro P. A., Califi E., Mejia-Salazar J. R., Palermo G., Jacob Z., Maccaferri N. New Horizons in Near-Zero Refractive Index Photonics and Hyperbolic Metamaterials. ACS Photonics. 2023. Vol. 10. P. 3805-3820. [New Horizons in Near-Zero Refractive Index Photonics and Hyperbolic Metamaterials | ACS Photonics](#)
10. Wang D., Dong K., Li J., Grigoropoulos C., Yao J., Hong J., Wu J. Low-loss, geometry-invariant optical waveguides with near-zero-index materials. Nanophotonics. 2022. Vol. 11(21). P. 4747-4753. DOI: 10.1515/nanoph-2022-0445 [Low-loss, geometry-invariant optical waveguides with near-zero-index materials](#)
11. Lobet, M., Kinsey, N., Liberal, I., Cardalvan, H., Huidobro, P. A., Gali, E., Mejía-Salazar, J. R., Palermo, G., Jacob, Z., & Maccaferri, N. (2024). New horizons in near-zero refractive index photonics and hyperbolic metamaterials.
12. Tirole, R., Tilmann, B., Menezes, L. S., Vezzoli, S., Sapienza, R., & Maier, S. A. (2023). Nonlinear dielectric epsilon near-zero hybrid nanogap antennas. [physics.optics]

13. Liberal, I., Lobet, M., Li, Y., & Engheta, N. Near-zero-index media as electromagnetic ideal fluids. Supplementary material for manuscript.
14. Lobet, M., Liberal, I., Vertchenko, L., Lavrinenko, A. V., Engheta, N., & Mazur, E. (2021). Momentum considerations inside near-zero index materials. *Light: Science & Applications*, 11:110. DOI: 10.1038/s41377-022-00790-z [Momentum considerations inside near-zero index materials | Light: Science & Applications](#)
15. Li, H., Zhou, Z., Sun, W., Lobet, M., Engheta, N., Liberal, I., & Li, Y. (2022). Direct observation of ideal electromagnetic fluids. *Nature Communications*. DOI: 10.1038/s41467-022-32187-2 [Direct observation of ideal electromagnetic fluids | Nature Communications](#)
16. Lio, G. E., Ferraro, A., Zappone, B., Parlar, J., Schab-Balcerzak, E., Umeton, C. P., Riboli, F., Kowordziej, R., & Caputo, R. (2023). Unlocking optical coupling tunability in epsilon-near-zero metamaterials through liquid crystal nanocavities. [physics.optics]
17. Liberal I., Engheta N. Nonradiating and radiating modes excited by quantum emitters in open epsilon-near-zero cavities // *Science Advances*. 2016. Vol. 2, No. 10. e1600987. DOI: 10.1126/sciadv.1600987 [Nonradiating and radiating modes excited by quantum emitters in open epsilon-near-zero cavities | Science Advances](#)
18. M. S. Antyufeyeva, "Cavity with dispersive medium that refractive index is positive and negative," 2011 *Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium*, 2011, pp. 73-76, doi: 10.1109/MRRS.2011.6053604