

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2024 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»**

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Розробка програмного комплексу для дослідження чутливих
телекомунікаційних пристроїв (детекторів) на базі метаматеріалів»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ТЗ-02

Пшеничний Олексій Володимирович _____

Керівник:

Асистент кафедри ТК НН ІТС,

Камаралі Роман Вадимович _____

Рецензент:

Доцент кафедри ІТТ НН ІТС,

Новогрудська Ріна Леонідівна _____

Засвідчую, що у цій дипломній
роботі немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«___» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Пшеничному Олексію Володимировичу

1. Тема роботи «Розробка програмного комплексу для дослідження чутливих телекомунікаційних пристроїв (детекторів) на базі метаматеріалів», керівник роботи Камаралі Роман Вадимович, затверджені наказом по університету від «22» травня 2024 р. № 2064-с.

2. Термін подання студентом роботи 10 червня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи:

- Наукові публікації та статті з тематики метаматеріалів та телекомунікаційних пристроїв.
- Програмне забезпечення MATLAB для моделювання та аналізу.
- Розробка графічного інтерфейсу користувача на основі JavaFX.

4. Зміст роботи:

- Здійснити огляд існуючих телекомунікаційних пристроїв на базі метаматеріалів та їх принципів дії.
- Проаналізувати переваги використання метаматеріалів у телекомунікаційних пристроях.

- Розглянути сучасні методи моделювання та аналізу чутливих телекомунікаційних пристроїв.
- Описати архітектуру розробленого програмного комплексу.
- Провести тестування програмного комплексу, описати план та результати тестування.
- Навести приклади виконання програми
- Розглянути можливості та перспективи подальшого розвитку програмного комплексу.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

- Тема, актуальність, мета та задачі дипломної роботи;
- Концепція LHM
- Основа сенсорів(детекторів)
- Розробка програмного комплексу
- Реалізація
- Результати роботи
- Загальний висновок по роботі

6. Дата видачі завдання 18 квітня 2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розробка, оформлення, узгодження та затвердження технічного завдання на роботу. Огляд інформаційних матеріалів. Підбір та опрацювання необхідної науковотехнічної літератури.	20.04.2024-28.04.2024	Виконано
2	Обґрунтування актуальності теми роботи, мети та задач дослідження, об'єкту та предмету дослідження	29.04.2024-10.05.2024	Виконано
3	Розробка програмного Комплексу	11.05.2024-05.06.2024	Виконано
4	Підготовка матеріалів до друку та оформлення пояснювальної записки	05.06.2024-08.06.2024	Виконано
5	Підготовка та оформлення презентації для доповіді	08.06.2024-14.06.2024	Виконано

Студент

Олексій ПШЕНИЧНИЙ

Керівник

Роман КАМАРАЛІ

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить 78 сторінок, 14 рисунків, 1 таблицю. Було використано 16 джерел інформації.

Актуальність роботи: Застосування метаматеріалів у сенсорних пристроях є перспективним напрямком в наукових дослідженнях та технологічних розробках. Вони можуть бути використані для створення сенсорів, які працюють у широкому діапазоні частот, від радіохвиль до інфрачервоного та видимого світла, а також ультразвукових хвиль. Це відкриває нові можливості для застосування сенсорів у таких галузях, як медицина, телекомунікації, безпека та інші

Мета: Розробка програмного комплексу для дослідження чутливих телекомунікаційних пристроїв (детекторів) на базі метаматеріалів з метою дослідження їх характеристик та можливостей застосування.

Об'єкт дослідження: Об'єктом дослідження є розробка програмного комплексу для дослідження чутливих телекомунікаційних пристроїв на базі метаматеріалів. Вивчення принципів роботи метаматеріалів, що використовуються в телекомунікаційних пристроях, розробку моделей та алгоритмів для симуляції їхніх характеристик, а також створення програмного забезпечення, яке дозволяє проводити аналіз та оптимізацію цих пристроїв.

Предмет досліджень: Предметом дослідження є методи, алгоритми та програмне забезпечення, що використовуються для моделювання та аналізу чутливих телекомунікаційних пристроїв, створених на основі метаматеріалів

Методи дослідження: аналіз літератури на наукових праць, моделювання та симуляція,

Отримані результати: Розроблений програмний комплекс дозволяє ефективно моделювати та аналізувати чутливі телекомунікаційні пристрої на базі метаматеріалів. Результати підтвердили життєздатність продукту і

його можливість для подальшого використання у наукових дослідженнях та практичних застосуваннях.

Галузь застосування: Розроблений програмний комплекс може бути застосований у галузі телекомунікацій, зокрема для проектування та аналізу чутливих сенсорів та детекторів, що використовуються в сучасних телекомунікаційних системах.

Ключові слова: Метаматеріали, чутливі телекомунікаційні пристрої, детектори, проектування, моделювання, Фано-резонанс

ABSTRACT

The thesis contains 80 pages, 14 figures, 1 table. 16 sources of information were used.

Relevance of the work: The use of metamaterials in sensor devices is a promising area in scientific research and technological development. They can be used to create sensors that operate in a wide range of frequencies, from radio waves to infrared and visible light, as well as ultrasonic waves. This opens up new possibilities for sensor applications in such fields as medicine, telecommunications, security, and others.

Objective: To develop a software package for the study of sensitive telecommunication devices (detectors) based on metamaterials in order to investigate their characteristics and application possibilities.

Object of research: The object of research is the development of a software package for the study of sensitive telecommunications devices based on metamaterials. The study of the principles of operation of metamaterials used in telecommunication devices, the development of models and algorithms for simulating their characteristics, and the creation of software that allows for the analysis and optimisation of these devices.

Subject of research: The subject of the study is the methods, algorithms and software used to model and analyse sensitive telecommunications devices based on metamaterials.

Research methods: literature analysis of scientific papers, modelling and simulation,

Results: The developed software package allows to effectively model and analyse sensitive telecommunication devices based on metamaterials. The results confirmed the viability of the product and its possibility for further use in scientific research and practical applications.

Field of application: The developed software package can be used in the field of telecommunications, in particular for the design and analysis of sensitive sensors and detectors used in modern telecommunications systems.

Keywords: Metamaterials, sensitive telecommunication devices, detectors, design, modelling, Phano resonance

ЗМІСТ

ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1	12
МЕТАМАТЕРІАЛИ. ДЕТЕКТОРИ	12
1.1 Концепція LHM.....	12
1.2 Основа сенсорів (детекторів).....	15
1.3 Детектори на основі поверхнево-посиленого комбінаційного розсіювання	17
1.4 Детектори на основі гіперболічних метаматеріалів та теорії ефективного середовища.....	25
1.5 Детектори на основі голографічного фазового градієнта.....	28
Висновки.....	31
РОЗДІЛ 2	34
Методи та обґрунтування вибору напрямку досліджень	34
2.1 Обґрунтування вибору напрямку досліджень.....	34
2.2 Методи вирішення завдань дослідження	34
2.3 Порівняльні оцінки методів	35
2.4 Розробка загальної методики проведення розрахунків.....	38
2.5 Гіпотези та принцип дії розробленої апаратури	38
2.6 Фано-резонанси.....	39
2.7 порушення симетрії	42
2.8 Формули та фізичний зміст параметрів.....	45
РОЗДІЛ 3	47
РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ	47
3.1. Опис розробки програми	47
Використані формули та скрипти.....	48
3.2. Тестування	53
Загальні висновки по роботі	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57
Додаток А.....	59

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

MM	метаматеріали
МП	метаповерхні
LHM	left-handed materials
RHM	Right-handed materials
MA	мета-атом
(RI)	від'ємний показник заломлення
SERS	поверхнево-посилене комбінаційне розсіювання
FR	резонанс Фано
HMM	гіперболічні метаматеріали
ЛПП	локалізовані поверхневі плазмони
SRR	резонатор з розщепленим кільцем
ASR	асиметричні розщеплені кільця
ЛППР	локалізованого поверхневого плазмонного резонансу
GCMM	гіроїдного кристала MM
FOM	коефіцієнт корисної дії
ЕІП	ЕМ-індукована прозорість

ВСТУП

Електромагнітні метаматеріали (ММ) та метаповерхні (МП) - це штучні середовища та поверхні з субхвильовим розділенням мета-атомів, призначені для аномальних маніпуляцій з властивостями світла. Завдяки великим перерізам розсіювання металевих/діелектричних мета-атомів можна не лише локалізувати сильні електромагнітні поля в глибокому субхвильовому діапазоні, але й розкласти та аналізувати падаючий світловий сигнал за допомогою надкомпактних установок, використовуючи ММ та МС. Таким чином, зондування резонансних спектральних відгуків від надзвичайно посиленої взаємодії між аналізованим шаром і оптичними ММ або МС, вимірювання зміни показника заломлення стало популярним і практичним застосуванням в області фотоніки. Більше того, розкладання та аналіз падаючого світлового сигналу можна легко здійснити за допомогою анізотропних МС, які можуть розсіювати світло в різних напрямках відповідно до його поляризації або довжини хвилі. Останні досягнення і потенційні застосування оптичних ММ і МС для вимірювання показника заломлення і визначення властивостей світла, які можуть бути легко інтегровані з різними електронними пристроями.

В останнє десятиліття з'явився новий науковий напрям, що базується на вивченні метаматеріалів. Не існує однозначного визначення метаматеріалів, але найбільш поширеним є те, що це штучні матеріали, виготовлені з періодичного розташування елементарних комірок, розмір яких набагато менший за довжину хвилі, з деякими унікальними властивостями. До таких властивостей відносяться одночасна від'ємна діелектрична проникність і проникність, що призводить до від'ємного показника заломлення, такі структури зазвичай називають *left-handed materials* (LHM). Використовуючи LHM при проектуванні структури, її властивості можуть бути адаптовані в більш широкому діапазоні, ніж у випадку з класичними матеріалами. Цікаві ефекти можна спостерігати при

поширенні електромагнітних хвиль, наприклад, зворотне поширення хвиль завдяки антипаралельній груповій і фазовій швидкості, що призводить до зворотного руху хвильових фронтів, в той час як енергія все ще рухається вперед від джерела, щоб задовольнити причинно-наслідкові зв'язки. Іншим бажаним ефектом є значне зменшення розмірів порівняно з класичними структурами, яке може бути досягнуте за певних умов, що відповідають конкретній конструкції.

Метаматеріали можуть бути використані для декількох цікавих пристроїв у мікрохвильовій і терагерцовій техніці, таких як антени, датчики, узгоджувальні мережі або нові суперлінзи з вищою фокусуючою здатністю, ніж у звичайних лінз, у таких сферах, як телекомунікації та біомедичне застосування.

РОЗДІЛ 1

МЕТАМАТЕРІАЛИ. ДЕТЕКТОРИ

1.1 Концепція LHM

Концепція LHM була вперше розроблена російським фізиком Віктором Веселаго в 1967 році. Він передбачив існування матеріалів, які можуть дозволити поширення електромагнітних хвиль з електричним полем, магнітним полем і фазовим вектором, що утворюють ліву тріаду, протилежну до загальновідомої правої тріади звичайних матеріалів (RHM). Він також продемонстрував, що такі матеріали допускаються рівняннями Максвелла. Найважливішими електромагнітними властивостями, відкритими Веселаго, є обернення закону Снелла, обернення ефекту Доплера та обернення випромінювання Вавілова-Церенкова. Кульмінація його роботи полягає не у використанні ЛГМ в одновимірних структурах, а в тому, що в реалізації двовимірних і тривимірних ізотропних і однорідних середовищ, які можуть підтримувати зворотні хвилі і мають від'ємний показник заломлення.

Оскільки метаматеріали є штучними матеріалами і деякі з їхніх властивостей не зустрічаються в природі, важливо, щоб рівняння Максвелла задовольнялися для отримання фізично значущого результату. Рівняння Максвелла в диференціальній формі мають такий вигляд

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.4)$$

де $\vec{E}$ (В/м) - густина електричного поля, $\vec{H}$ (А/м) - густина магнітного поля, $\vec{D}$ (С/м²) - густина електричного потоку, $\vec{B}$ (Вт/м²) - густина

магнітного потоку, $\vec{M}$ (В/м2) - (фіктивна) густина магнітного струму, $\vec{J}$ (А/м2) - густина електричного струму і ρ (С/м3) - густина електричного заряду. Якщо середовище лінійне, недисперсійне, однорідне та ізотропне, то додаткові співвідношення визначаються наступним чином

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon \vec{E} \quad \epsilon_r = \epsilon - j\epsilon \quad (1.5)$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H} \quad \mu_r = \mu - j\mu \quad (1.6)$$

де $\vec{P}$ і $\vec{M}$ - електрична і магнітна поляризація, χ_e і χ_m - електрична і магнітна сприйнятливість, ϵ_0 і μ_0 - діелектрична проникність і проникність вільного простору, ϵ_r і μ_r - діелектрична проникність і проникність матеріалу, що розглядається.

Розглядаючи гармонічну залежну від часу плоску хвилю, що поширюється в напрямку x з електричним полем, поляризованим у напрямку z , в однорідному, ізотропному і лінійному середовищі, хвильове рівняння Гельмгольца має такий вигляд

$$\partial_x^2 E_z(x) + \omega^2 \mu \epsilon E_z(x) = 0 \quad (1.7)$$

$$\partial_y^2 H_y(x) + \omega^2 \mu \epsilon H_y(x) = 0. \quad (1.8)$$

Припускаючи гармонічні поля з часовою залежністю $e^{j\omega t}$, розв'язок $E_z(x)$ та $H_y(x)$ можна подати у вигляді

$$E_z(x) = C_1 e^{-j\gamma x} + C_2 e^{j\gamma x} \quad (1.9)$$

$$H_y(x) = \frac{1}{\eta} (C_1 e^{-j\gamma x} + C_2 e^{j\gamma x}), \quad (1.10)$$

$$\gamma = \pm j\omega \sqrt{\mu \epsilon} \quad (1.11)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (1.12)$$

де $\eta(\omega)$ - хвильовий імпеданс для плоскої хвилі, що визначається як відношення полів E^- і H^- , а γ (1/m) - стала поширення. Оскільки будь-який фізичний сценарій може бути виражений як суперпозиція плоских хвиль різних частот згідно з теоремою перетворення Фур'є, то, розглядаючи одну плоску хвилю, можна отримати необхідну інформацію про фундаментальний відгук середовища.

Якщо розглядати середовище без втрат і припустити, що μ і ϵ додатні, то постійна поширення є чисто уявною, і плоска хвиля буде поширюватися назовні від джерела. При розгляді більш загального випадку, коли μ і ϵ можуть набувати будь-яких значень, в тому числі одночасно від'ємних, стала поширення поводить себе більш складно і потрібно враховувати як дійсну, так і уявну її частину, і вона визначається формулою

$$\gamma = \alpha + j\beta = \pm j\omega \sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon}}, \quad (1.13)$$

де σ - провідність. Оскільки нас цікавить аналіз того, чи є ЛГМ життєздатними з точки зору причинності, а отже, чи можна їх використовувати для побудови періодичних структур, ми розглянемо випадок, коли обидві змінні μ і ϵ від'ємні. Підставивши це міркування в рівняння 1.13, можна помітити, що константа затухання α залишається незбуреною порівняно з тим, коли обидві змінні додатні, але цікава зміна відбувається у фазовій константі β . β для RHM додатна, а для LHM від'ємна. Це призводить до того, що еквіфазні фронти рухаються вперед (від джерела) для RHM і назад (до джерела) для LHM. Для того, щоб задовольнити причинно-наслідковий зв'язок у LHM, слід ретельно проаналізувати, що саме поширюється в напрямку до джерела. Поширення енергії не обов'язково збігається з поширенням протифазних фронтів, для LHM вони мають протилежні напрямки, це означає, що енергія завжди буде поширюватися вперед, тоді як протифазні фронти рухаються назад. Це можна побачити у фазовій швидкості v_p і груповій швидкості v_g наступним чином

$$v_p = \omega\beta \quad (1.14)$$

$$v_g = \partial\omega \quad (1.15)$$

і характеристики розповсюдження як для RHM, так і для LHM можна підсумувати наступним чином

$$\text{RHM} : \beta > 0, v_p > 0, v_g > 0 \quad (1.16)$$

$$\text{LHM} : \beta < 0, v_p < 0, v_g > 0. \quad (1.17)$$

Хоча ідея зворотного поширення на перший погляд здається тривожною, вона набуває цікавого сенсу, коли ми розуміємо, що фазова швидкість відповідає лише поширенню збурення, а не самої енергії. З іншого боку, від'ємна групова швидкість була б абсолютно непрактичною і порушувала б закон причинності. Оскільки було доведено, що LHM можна виготовити і використовувати для взаємодії з електромагнітними хвилями.

1.2 Основа сенсорів (детекторів)

Електромагнітні (ЕМ) метаматеріали (ММ) та метаповерхні (МП) сьогодні стають все більш популярними об'єктами досліджень завдяки їхнім аномальним властивостям розсіювання світла в надкомпактному об'ємі, що значною мірою піддаються налаштуванню. Ефективність ММ і МС залежить від їхнього субхвильового розділення та геометричних параметрів кожного мета-атома (МА), фундаментальної складової ММ і МС. МА складаються з однієї або декількох субхвильових наноструктур з благородними металами або діелектриками з високим індексом діелектричної проникності. Вони сконструйовані таким чином, щоб демонструвати бажані ефективні локальні оптичні реакції, які можуть бути виражені в термінах амплітуди і фази або електричної і магнітної поляризованості. Екзотичні функціональні можливості, такі як від'ємний показник заломлення (RI), майже ідеальне поглинання і пропускання, були продемонстровані з різними потенційними застосуваннями. Серед різних потенційних застосувань, включаючи суперлінзи, повільне світло і

маскувальні пристрої, біосенсиори з від'ємним показником заломлення є найбільш реалістичним і репрезентативним застосуванням RI. Біомолекулярні взаємодії, що відбуваються в шарах аналізованої речовини, призводять до зміни RI.

ЕМ RI-сенсор пропонує відмінні можливості для чутливих і безмішкових біохімічних аналізів, завдяки чому він може відігравати вирішальну роль у різних технологіях хімічного і біологічного зондування.

Шляхом конструювання окремих МА та їх розташування можна значною мірою налаштувати резонансні ЕМ спектри, в яких домінує навколишнє середовище. Завдяки таким резонансним властивостям, можна дослідити RI оточуючого біомолекулярного аналіту за допомогою варіації спектрів розсіяного випромінювання. Отже, важливо розробити відповідні чутливі МА на цільових довжинах хвиль і певних конфігураціях. Крім того, сенсорні платформи на основі ММ і МС мають кілька переваг над традиційними біосенсорами на основі СЗП. По-перше, оскільки зміна RI виявляється за допомогою макроскопічних оптичних реакцій, в основному відбиття або пропускання сфокусованих вхідних променів, датчики RI на основі ММ і МС є кращими за біосенсиори на основі SPP з точки зору толерантності до виготовлення і стабільності сигналу зчитування. По-друге, періодичне розташування МА дозволяє знизити радіаційне загасання і підвищити добротність завдяки цікавим фізичним механізмам, включаючи плазмонно-індуковану прозорість і резонанси Фано. Нарешті, можна було б розширити функціональні можливості одного нанофотонного RI-сенсора за допомогою ММ або МС. Делікатні і складні композиції декількох різних МА в елементарній комірці або надкомірці можуть створювати множинні резонанси і широкосмутові явища повільного світла, які важко допустити в сенсорах на основі СФП.

З іншого боку, саме зондування світла за допомогою взаємодії світлової матерії також є ретельно вивченою темою в оптичному

співтоваристві. На основі інтерференції між кількома пучками, анізотропного розсіювання і дисперсійних відгуків певних ЕМ-пристроїв можна відчувати і проаналізувати фундаментальні властивості довільної падаючої ЕМ-хвилі. Поляризація і спектральний склад є основними характеристиками, що становлять інтерес, і для їх аналізу існують комерційні об'ємно-оптичні прилади, які називаються поляриметрами і спектрометрами. Оскільки вимоги до інтеграції та мініатюризації таких світлочутливих компонентів для електронних пристроїв стрімко зростають, очікується, що ММ і МС стануть перспективною платформою для реалізації цих функцій при компактному об'ємі та малій вазі.

Останні досягнення і потенційні застосування ЕМ ММ і МС для різних сенсорів. В основному класифікуємо сенсорні застосування на два основні об'єкти зондування ММ і МС: Зондування RI з оптичним відгуком і зондування властивостей самого світла. Спочатку обговорюються методи зондування RI з огляду на їхні фізичні механізми та можливості зондування. Представлено поверхнево-посилене комбінаційне розсіювання (SERS), резонанс Фано (FR) і гіперболічні метаматеріали (HMM) та запропоновано їх застосування для зондування RI. Порівнюються характеристики цих конфігурацій і обговорюються потенційні нові методи зондування RI на основі голографічного фазового градієнта (ГФГ). По-друге, обговорюються різні функціональні можливості МС як ультратонкого плаского аналізатора світла. Пояснюється аналіз властивостей світла, таких як поляризаційний стан і спектр, за допомогою МС.

1.3 Детектори на основі поверхнево-посиленого комбінаційного розсіювання

Комбінаційне розсіювання - це непружне розсіювання фотонів молекулами, які збуджені до вищих коливальних або обертальних енергетичних рівнів (рис. 1.1).

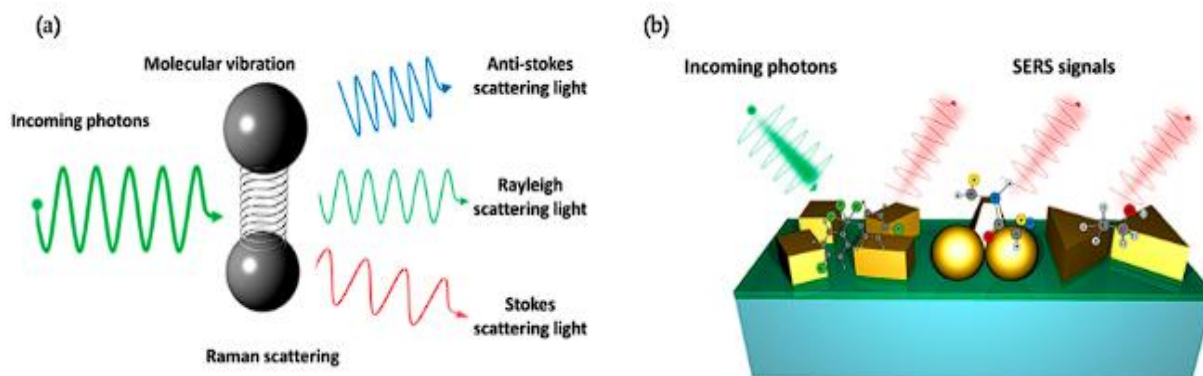


Рис. 1.1 (а) Принцип комбінаційного розсіювання;
 (б) Ілюстрація зондування SERS. Шорсткий метал поверхня металу або металеві наноструктури можуть посилювати сигнали комбінаційного розсіювання, і їх можна застосовувати для біологічного та хімічного зондування.

Спектри комбінаційного розсіяння світла широко використовуються для ідентифікації та аналізу матеріалів, оскільки вони залежать від молекулярних станів. Особливо очевидною перевагою цього методу є те, що його можна використовувати для виявлення та аналізу не тільки простих матеріалів, включаючи тверді речовини, рідини та гази, але й дуже складних матеріалів, таких як людські тканини, біологічні організми та хімічні матеріали. Завдяки винаходу і розвитку лазерів у 1960-х роках, раманівська спектроскопія стала важливим методом вимірювання, що дозволяє отримати структурний відбиток, за яким можна ідентифікувати молекули в різних хімічних процесах.

Незважаючи на універсальність цього методу, знадобилося багато часу, щоб застосувати раманівське розсіювання безпосередньо до датчика через його малий переріз розсіювання. Коли розсіювання відбувається між речовиною і світлом, більшість фотонів пружно розсіюється, так зване релеєвське розсіювання, так що розсіяні фотони мають ту ж частоту, що і

падаючі фотони. Лише невелика частина розсіяних фотонів, приблизно 1 з 10 мільйонів, розсіюється збудженням, причому розсіяні фотони мають частоту, відмінну від частоти падаючих фотонів. Тому через низьку ймовірність комбінаційного розсіювання молекул задовільні спектри комбінаційного розсіювання навряд чи можна отримати в середовищах з низькою концентрацією зразка, наприклад, в тонких плівках, покритих розведеними розчинами або моношарами. Інша проблема полягає в тому, що зразки, які мають колір або флуоресценцію, не можуть бути легко досліджені за допомогою спектрів комбінаційного розсіювання, на відміну від чистих або безбарвних зразків. Крім того, дуже важко отримати точні результати у випадку зразка, який генерує фонові флуоресцентні сигнали при освітленні лазером у видимій області, якщо вони сильніші, ніж сигнали комбінаційного розсіювання самого зразка. Загалом, нерезонансне комбінаційне розсіювання зазвичай становить близько 10-30 см²/молекулу і на 14-15 порядків нижча, ніж у флуоресценції. З цих причин раманівська спектроскопія використовувалася лише в спеціальних галузях і не була популярною як типовий метод аналізу до 1960-х років. У 1974 році Флейшман та ін. помітили посилення сигналів комбінаційного розсіювання піридину, поглиненого електрохімічно шорстким сріблом. Серія експериментів 1977 року підтвердила, що сигнали комбінаційного розсіювання можуть бути значно посилені, коли молекули знаходяться дуже близько до шорстких металевих поверхонь або наноструктур. Це явище було названо поверхнево-посиленням комбінаційним розсіюванням (SERS) або поверхнево-посиленою спектроскопією комбінаційного розсіювання (рис. 1.16).

Протягом кількох десятиліть для отримання більш посилених сигналів дослідники в основному використовували благородні метали, такі як золото або срібло, а також різні наноструктури як плазмові антени. Це пов'язано з тим, що металеві наноантени мають здатність підтримувати

локалізовані поверхневі плазмони (ЛПП), тобто нерозповсюджені збудження електронів провідності, зв'язані з ЕМ полем. З точки зору ЕМ, через малий зсув Стокса, зазвичай припускають, що випромінювальне поле Стокса дорівнює підсиленню збуджуючого поля, таким чином, раманівський переріз (R) можна виразити як $R = |E_{\text{loc}}|^4/|E_i|^4$, де $|E_{\text{loc}}|$ - локальна амплітуда поля раманівської активної зони, а $|E_i|$ - поле падіння. Дослідники ввели поняття коефіцієнта підсилення (EF), який є одним з найважливіших показників для характеристики ефекту SERS.

Добре відомо, що в безпосередній близькості від поверхні металу підсилення ЕМ поля за рахунок ЛСП є особливо сильним на гострих кінчиках, нанорозривах, таких як апертура або пори, та міжчастинкових проміжках. Дослідники зосередили свої зусилля на дизайні підкладок SERS, таких як індивідуальний розмір, форма, періодичність і відстань між шарами, з сильно локалізованим ЕМ полем, яке може збуджувати сильне комбінаційне розсіювання. Завдяки їхнім дослідженням спостерігається сильне SERS з ЕП 108-1014 разів, що дозволяє виявляти окремі молекули. У наступній таблиці узагальнено особливості різних наноструктур для SERS (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Різні типи наноструктур для SERS та їх особливості.

Тип	Особливості
Tip	Генерація сильного локалізованого поверхневого плазмонного резонансу (LSPR) за допомогою спектроскопії раманівського розсіювання світла з посиленням tip (TERS) Зображення з обмеженим використанням дифракції за допомогою скануючої зондової мікроскопії (SPM) Відносно складно виготовити і відтворити
Gap	Виявлення окремих молекул за допомогою нанозазорів Відносно просте виготовлення (електронно-променева літографія, сфокусований іонний пучок)
Pore	Легко комбінується зі структурою матриці для виняткової оптичної передачі (EOT) Легко налаштовуються геометричні параметри (період, розмір)
Sphere	Відносно проста у виготовленні (пакетна обробка на основі розчину) Висока ефективність і стабільність (плівка Ag на підкладці з наносфери) Висока реакційна здатність при великій площі поверхні

Незважаючи на те, що було досягнуто збільшення EF сигналу SERS за допомогою різних конструкцій підкладок SERS, його застосування все ще обмежене поганою відтворюваністю посилених сигналів і структурною нееластичністю. Більшість підкладок SERS можуть працювати лише на певній довжині хвилі збудження, тому для аналізу на різних довжинах хвиль збудження потрібні різні типи підкладок. З точки зору можливості проектування оптичних резонансних характеристик, ММ і МС можуть бути багатофункціональними підкладками для SERS. Щоб зрозуміти це, введено структуру резонатора з розщепленим кільцем (SRR), яка є однією з найвідоміших структур в якості МА ММ. Структура, форма якої нагадує букву «С» (див. рис. 1.2), цікавить багатьох дослідників з початку 2000-х років, оскільки дозволяє реалізувати речовини з оптичними властивостями, які не зустрічаються в природі. Існує низка досліджень з реалізації від'ємної діелектричної проникності та проникності від гігагерцового до ближнього інфрачервоного діапазону частот. Принцип роботи SRR полягає в наступному: При проходженні падаючого світла через SRR, вздовж структури утворюється петлевий струм. Збуджена кільцева петля струму працює як магнітний диполь, і кожне кільце має індивідуальний відгук, який контролюється зазором. Було підтверджено, що петля струму і магнітне поле генеруються, коли падає х-поляризоване падіння, як показано на рисунку 1.2.

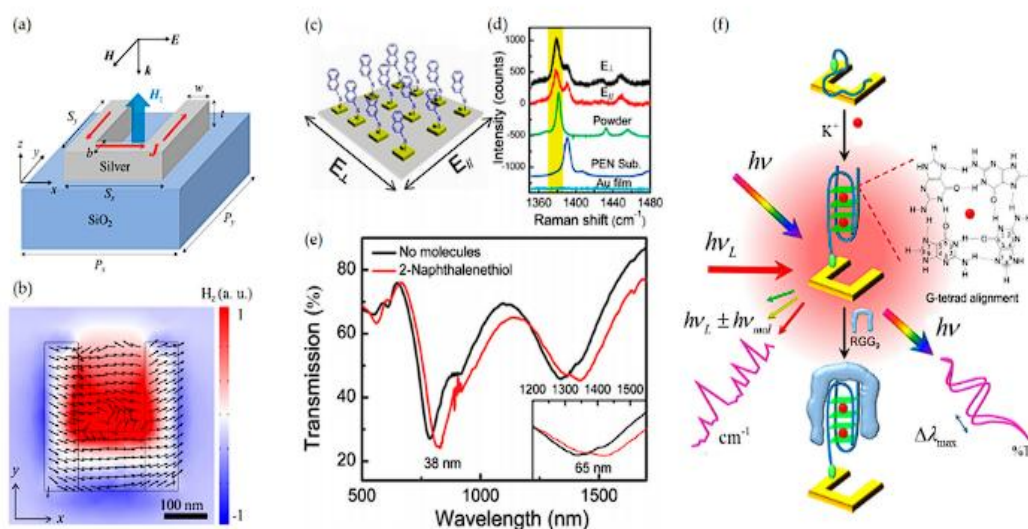


Рис 1.2. (а) Схематичне зображення SRR. Описано структурні параметри. Магнітне поле генерується вздовж осі z , коли x -поляризоване падіння падає вздовж осі z .

б) Профіль Гц-поля на резонансі. Показано генерацію петель струму (чорні стрілки). Умови резонансу такі: $\lambda = 1300$ нм, $S_x = S_y = 320$ нм, $P_x = 504$ нм, $P_y = 480$ нм, $w = 80$ нм, $t = 30$ нм, $b = 128$ нм;

(с) Схематичне зображення хімічного сенсора 2-нафталенетіолу з використанням ММ; (д) Раманівські спектри 2-нафталінетіолу на різних середовищах підкладки; (д) Спектри пропускання з 2-нафталінетіолом та без нього;

(е) Спектри пропускання з та без 2-нафталінетіолу. На вставці - збільшене зображення спектрів в околі магнітного резонансу режимі магнітного резонансу.

Однак, ЕМ хвиля взаємодіє як однорідне середовище, коли багато SRR розташовані з періодичністю субхвильового масштабу, таким чином, можна контролювати магнітний відгук, який зустрічається в природі на

лазерному масштабі. Крім SRR, активно пропонуються різні типи наноструктур, які призначені для отримання бажаних оптичних відгуків.

ММ і МС є гарними кандидатами для використання в якості підкладки SERS, оскільки їхня металева поверхня може збуджувати поверхневі плазмонні поляритони (ПП), які сприяють посиленню сигналів комбінаційного розсіювання, а ЕМ-відгуки у всьому діапазоні видимої та інфрачервоної області спектра для виявлення біомолекул і білків можна контролювати за допомогою інженерних МА. Сюй та ін. розробили підкладку SERS за допомогою ММ на основі SRR і досягли хімічного зондування. Сао та ін. продемонстрували регульований наносенсор на основі ММ на основі видимої інфрачервоної спектроскопії з молекулярним детектуванням SERS. SRR був розроблений таким чином, щоб мати два резонансних піки, електричний і магнітний резонанси, відповідно, і запропонований датчик проводив два паралельних знімання спектрів оптичного пропускання і SERS на біоінтерфейсі. Було встановлено, що ЕП становить близько $6,5 \times 10^7$, що є достатньо сильним, щоб забезпечити чутливість виявлення однієї молекули. Крім того, вони вперше досягли використання ММ як логічних вентилів на основі SERS, що слугують сенсорами іонів ртуті з високою чутливістю, використовуючи SRR-структуру.

Також, серед різних типів ММ, варто відзначити використання нанодисків як підкладки для SERS. Цей тип наноструктури має ряд переваг, таких як простота виготовлення, поляризаційно-незалежна властивість і відносно простий контроль параметрів (радіус і товщина). Крім того, ММ можуть контролювати резонансну довжину хвилі ФНП і ЛНП, керуючи періодом решітки і діаметром частинок. Було висловлено припущення, що довжина хвилі локалізованого поверхневого плазмонного резонансу (ЛППР) повинна знаходитися між довжиною хвилі комбінаційного розсіювання і довжиною хвилі збудження, оскільки ЕРС СЕР пропорційна

добутку напруженості поля як на довжині хвилі комбінаційного розсіювання, так і на довжині хвилі збудження (див. рис. 3б). Y. Chu та ін. запропонували дворезонансні плазмонні підкладки, що складаються з масиву золотих дисків, діелектричного проміжку і золотої плівки, і отримали ЕП $7,2 \times 10^7$, що більш ніж на два порядки більше, ніж виміряно на масиві золотих наночастинок на простій скляній підкладці. Крім того, нанопористі плазмонні ММ привертають увагу завдяки простоті їх виготовлення, наприклад, розплавлення та шаблонування. Jiao та ін. досягли ЕП $5,0 \times 10^7$, використовуючи двовимірну візерунчасту нанопористу золоту плівку, а Zhang та ін. продемонстрували, що датчик на основі нанопористих ММ показує вищий ЕП, ніж датчик на основі мезопор або наноотворів.

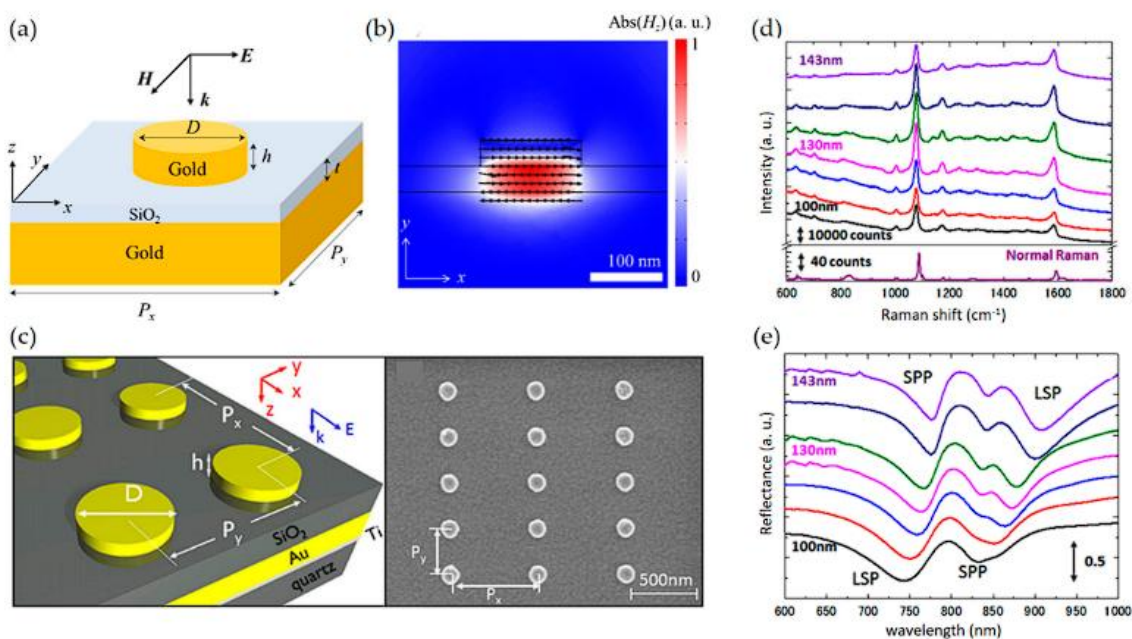


Рис. 1.3. (а) Схематична конфігурація ММ на основі нанодисків; описано структурні параметри.

(б) Абсолютне значення профілю Гц поля на резонансі. Показано генерацію петель струму (чорні стрілки). Умови резонансу: $\lambda = 879$ нм, $D = 130$ нм, $h = 30$ нм, $t = 30$ нм, $P_x = 580$ нм, $P_y = 300$ нм;

(с) Схематичне зображення підкладки масиву золотих нанодисків з подвійним резонансом (ліва панель) та його РЕМ-зображення (права панель);

(д) Спектри РЕМ на подвійних резонансах. Діаметр змінюється від 100 до 143 нм (від чорного до фіолетового);

(е) Спектри відбиття, що відповідають (д).

1.4 Детектори на основі гіперболічних метаматеріалів та теорії ефективного середовища

ГММ(гіперболічні метаматеріали) - це ММ, які демонструють надзвичайну анізотропію з гіперболічною дисперсією світла. ГММ утворені чергуванням металів та ізоляторів у межах субхвильових періодів (Рис. 1.4а-d) і представлені простими кривими ізочастотної дисперсії, як показано в рівняннях (3) і (4). Ці прості дисперсії отримані з використанням тензорів ефективної діелектричної проникності на основі теорії ефективного середовища Максвелла-Гарнетта (ЕМТ). Як показано на рисунку 1.4 та рівняннях (3) і (4) (див рис.1.8), існує два популярних типи структур ГММ залежно від напрямку від'ємної ефективної діелектричної проникності. Один з них має від'ємну вертикальну діелектричну проникність, тоді як інший має від'ємну діелектричну проникність у горизонтальному напрямку. Напрямок від'ємної ефективної діелектричної проникності визначається допустимим напрямком струму (див. червоні стрілки на рис. 1.4а,б), в той час як коефіцієнт заповнення і композиційні матеріали правильно підбираються для різних знаків діелектричних проникностей

$$1 = \frac{k_x^2}{\varepsilon_z k_0^2} + \frac{k_y^2}{\varepsilon_x k_0^2} + \frac{k_z^2}{\varepsilon_x k_0^2} \quad (\varepsilon_x > 0, \varepsilon_y = \varepsilon_z < 0), \quad (3)$$

$$1 = \frac{k_x^2}{\varepsilon_z k_0^2} + \frac{k_y^2}{\varepsilon_z k_0^2} + \frac{k_z^2}{\varepsilon_x k_0^2} \quad (\varepsilon_x = \varepsilon_y < 0, \varepsilon_z > 0). \quad (4)$$

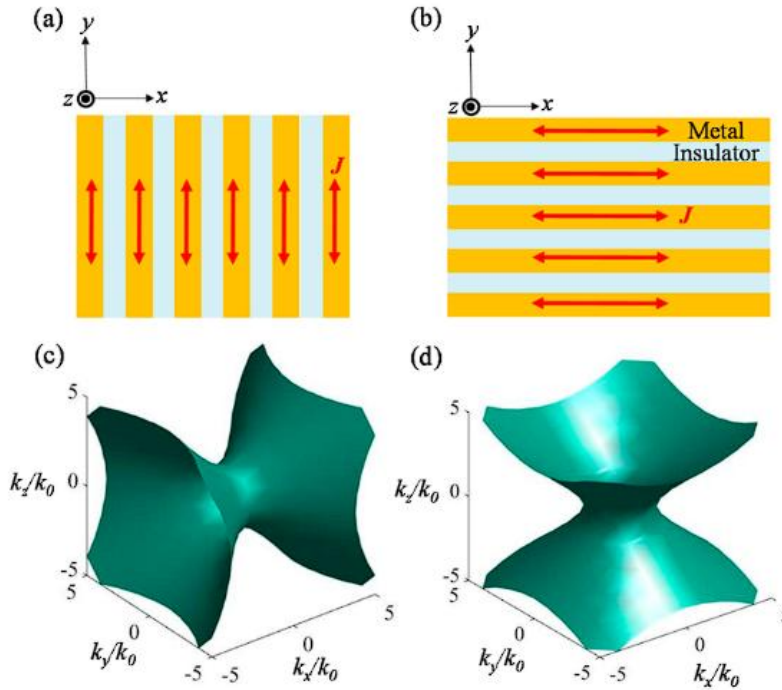


Рис. 1.4. Схеми основних типів ГММ, оптичні осі яких лежать у: (а) горизонтальному (напрямок x); та (б) перпендикулярному (напрямок y) напрямках; (в,г) відносяться до ізочастотних поверхонь дисперсії в нормованому імпульсному просторі для ГММ зі структурами (а,б). Аналітичними виразами графіків (с,д) є рівняння (3) і (4).

Оскільки дифракція з високими ефективними показниками в перпендикулярному напрямку дозволена в двох різних ГММ, зв'язок між падаючим світлом і перпендикулярно дифрагованими модами в ГММ буде надзвичайно чутливим до зовнішнього середовища зв'язку і матеріалів, з яких виготовлені ГММ.

Останнім часом з'явилися чудові досягнення в застосуванні вищезгаданих чутливих характеристик ГММ до сенсорів РІ. У 2009 році Кабашин та ін. запропонували ГММ зі стоячими нанострижнями (рис. 9а)

як нанофотонний біосенсор без мітки для підвищення спектральної чутливості понад 30 000 нм/РІУ. Запропонований пристрій працює за схемою АТР, де нанострижень НММ закріплено на призмі та покритий мікрофлюїдним каналом, а вхідне широкосмугове джерело падає похило з боку призми. Оскільки керована мода з плазмонною підтримкою поширюється в дуже обмеженому електромагнітному полі в області нанострижнів, взаємодія між шаром ізолятора підкладки (аналізованим шаром) і керованою перпендикулярною модою надзвичайно посилюється. Спектри АТР на рисунку 9в показують, що резонансні провали керованої моди виникають поблизу довжини хвилі 1200 нм при р-поляризованому світлі. Сильно зв'язаний резонанс керованої моди і залежність ефективного індексу керованої моди від RI підкладки призвели до значного покращення спектральної чутливості.

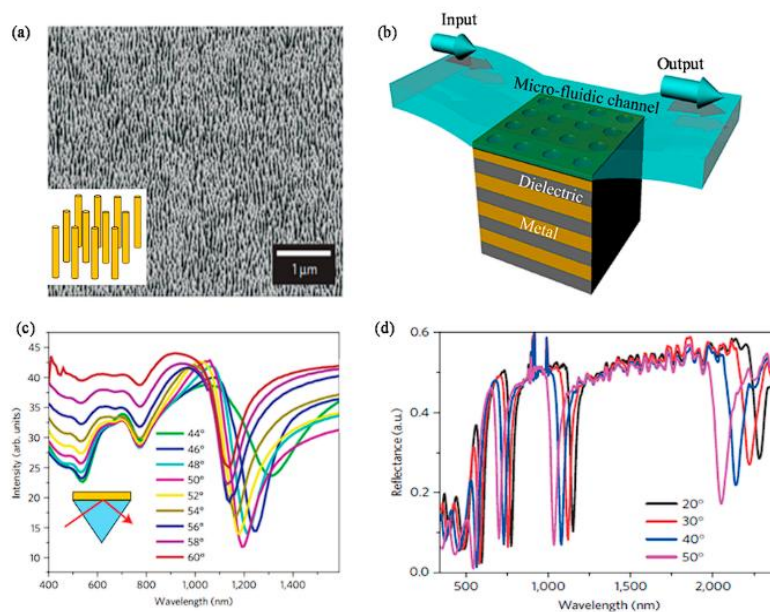


Рис. 1.5. (а) Растрова електронна мікроскопічна картина збірки стоячих золотих наностержнів з субхвильовими проміжками, зроблена А. В. Кабашиним та ін. . На вставному рисунку представлена збільшена схема стоячих золотих нанострижнів; (б) Схема ґратчастого ГМО, що складається з почергово стратифікованих металевих наношарів та діелектричних наношарів, продемонстрована Sreekanth et al.; (с) Спектри ослабленого повного відбиття (АТР) для дев'яти різних кутів падіння, коли нанострижневий ГММ (а) знаходиться у водному середовищі ($n = 1.33$); (д) Спектри АТР ґратчастого ГММ, зображеного на рисунку (б), для чотирьох різних кутів падіння.

У 2016 році Sreekanth та ін. продемонстрували пристрій НММ з решіткою (рис. 9b), який має надзвичайно високу спектральну та кутову чутливість, що перевищує попередні традиційні сенсори RI на основі поверхневого плазмонного резонансу. Вони запропонували структуру з ГММ, вкритим двовимірною нанодірчастою решіткою і мікрофлюїдним каналом на ній. Подібно до вищезгаданої ГММ зі стоячими нанострижнями, у стратифікованій області ГММ від видимого до ближнього інфрачервоного діапазону підтримуються множинні високодисперсні об'ємні плазмонні моди з надзвичайно великим обмеженням полів. Відмінності від вищезгаданих нанострижневих ГММ полягають у наступному. По-перше, біосенсор Sreekanth та ін. може працювати від видимого до ближнього інфрачервоного діапазону, як показано на рисунку 1.5 за допомогою множинних керованих модових резонансів. По-друге, оскільки в ньому використовується техніка решітчастого зв'язку, а не ATR, установка є більш мініатюрною при відмінній продуктивності. Зв'язок між падаючим широкосмуговим джерелом і об'ємними плазмонними модами досягається за допомогою двовимірної решітки, а не призми. Решітка уможливорює велику кількість високочастотної дифракції в гіперболічній області. Їхній прилад демонструє рекорди спектральної чутливості, що сягає 30 000 нм/РІУ з FOM 590 і кутовою чутливістю 7000 градусів/РІУ, що значно перевищує традиційні плазмонні і нанофотонні біосенсорні платформи, засновані на ATR, локалізованих поверхневих плазмонних резонансах і екстраординарній трансмісії. Більше того, вони повідомляють про здатність виявляти біомолекули з надзвичайно низькою молекулярною масою (244 Да) при пікомолярних концентраціях.

1.5 Детектори на основі голографічного фазового градієнта

Відтоді, як Н. Ю. та ін. запропонували концепції голографічного фазового стрибка та узагальненого закону Снелла, багато уваги було

приділено різним схемам МС для ультратонких плоских оптичних компонентів, спрямованих на екзотичне викривлення світла, фокусування світла, фокусування світла та голографічне зображення. Рівняння позначають аналітичні принципи пропускання і відбивання відповідно.

$$n_t \sin \theta_t - n_i \sin \theta_i = \frac{1}{k_0} \frac{d\Phi}{dz}$$

$$\sin \theta_r - \sin \theta_i = \frac{1}{n_i k_0} \frac{d\Phi}{dz}$$

де n_t , n_i , θ_t , θ_i , k_0 і Φ позначають показник заломлення вихідної області пропускання, показник заломлення вхідної області, кут пропускання, кут падіння, хвильове число у вакуумі та стрибок оптичної фази на МС залежно від розташування. На відміну від оригінального закону заломлення Снелла, новий узагальнений закон враховує різкий стрибок оптичної фази, спричинений ультратонким оптичним МС на межі поділу двох оптичних середовищ (n_t і n_i). Таким чином, узагальнений закон Снелла припускає, що різні функціональні можливості згинання, фокусування і формування зображень доступні при проектуванні ГПГ на МС. Фаза Панчаратнама Беррі з анізотропними і мультимодальними V-подібними МА були використані для конструювання просторових ГПГ.

Цей аномальний принцип з великою перестроюваністю може бути застосований і до різних методів зондування РІ. Розглянемо найпростіші конфігурації для вимірювання показників заломлення аналітів монохроматичним когерентним світлом, кут заломлення якого контролюється кутом падіння та ГПГ. Як показано на рис. 10а,б, схеми складаються з підкладки, МС, на яку нанесено ГПГ, і шару аналізованого матеріалу. Рисунок 10а описує випадок, коли вхідний промінь падає з боку підкладки і заломлюється в аналізованому шарі. Зміна нанорозміру виявляється за зміною θ_t , яка може бути вільно розрахована на основі рівняння (5). Рисунок 1.6б описує випадок, коли вхідний промінь падає з

боку шару аналіту і заломлюється в бік підкладки. Використовуючи визначення чутливості на основі резонансних нанофотонних сенсорів, кутові чутливості цих нерезонансних конфігурацій можна аналітично визначити, як показано в рівнянні . Перший і другий рядки в правій частині рівняння позначають випадки, показані на рисунку 1.6а (випадок 1) і 1.6б (випадок 2), відповідно.

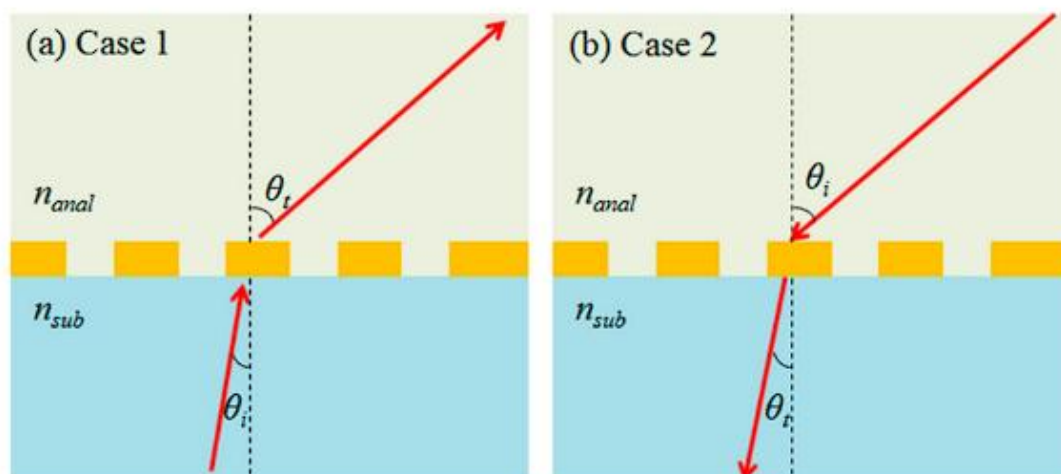


Рис. 1.6. Найпростіші схеми вимірювання показника заломлення за допомогою HPG MS і перенастроюваних заломлень при падінні вхідного променя з боку (а) підкладки і (б) аналізованого шару над підкладкою. n_{anal} , n_{sub} , θ_i і θ_t позначають показник заломлення аналізованого шару, показник заломлення підкладки, кут падіння вхідного променя і кут заломлення пропущеного променя. Жовті шаблони представляють довільну HPG MS.

$$S = \frac{\partial \theta_t}{\partial n_{anal}} = \begin{cases} -(\alpha^3 / n_{anal}^2) \sqrt{1 - (\alpha / n_{anal})^2}, & \left(\alpha = n_{sub} \sin \theta_i + \frac{1}{k_0} \frac{d\Phi}{dx} \right) \text{ for case 1} \\ \frac{\sin \theta_i}{n_{sub}} \sqrt{1 - (n_{anal} \sin \theta_i - \frac{1}{k_0} \frac{d\Phi}{dx})^2 / n_{sub}^2}, & \text{for case 2} \end{cases}$$

$$S_{max} = \begin{cases} \left. \frac{\partial \theta_t}{\partial n_{anal}} \right|_{\frac{1}{k_0} \frac{d\Phi}{dx} = \pm \frac{\sqrt{3}}{2} n_{anal} - n_i \sin \theta_i} = \frac{3\sqrt{3}}{16} n_{anal} [\text{deg/RIU}], & \text{for case 1} \\ \left. \frac{\partial \theta_t}{\partial n_{anal}} \right|_{\frac{1}{k_0} \frac{d\Phi}{dx} = n_{anal} \sin \theta_i} = \frac{\sin \theta_i}{n_{sub}} [\text{deg/RIU}]. & \text{for case 2} \end{cases}$$

Рис. 1.7. Рівняння залежності

Як показано в рівнянні, кутова чутливість сильно залежить від кута падіння світла, з якого падає світло, і від конструкції HPG на МС. Припускаючи певні умови падіння світла і конкретний аналіт, що цікавить, максимальна кутова чутливість сенсора HPG на МС може бути отримана аналітично, як показано в рівнянні. Незважаючи на те, що чутливість двох конфігурацій не можна порівняти зі звичайними резонансними датчиками, варто зазначити, що вимірювання RI можливе за допомогою монохроматичного лазерного випромінювання і камери для вимірювання зміни напрямку заломлення, а не за допомогою звичайної і більш громіздкої установки з широкосмуговим джерелом світла і оптичним спектрометром. Хоча тут представлено найпростіші конфігурації для підтвердження концепції з низькою чутливістю, якщо конфігурації з високоіндексними або резонансними МА сконструювати за допомогою МС HPG, кутову і спектральну чутливість можна значно покращити. Крім того, можна також створити нові МС-сенсори з широкосмуговим джерелом вхідного сигналу, якщо використати залежні від довжини хвилі властивості HPG і кута заломлення резонансних МА.

Висновки

Метаматеріали та метаповерхні є інноваційними штучними середовищами, що завдяки своїм субхвильовим структурам дозволяють маніпулювати електромагнітними хвилями в унікальний спосіб. Вони

відкривають нові можливості для розробки чутливих телекомунікаційних пристроїв, таких як датчики та сенсори, що використовують гіперболічні метаматеріали, голографічний фазовий градієнт, Фано-резонанси та інші передові принципи.

Вимірювання властивостей світла за допомогою метаматеріалів дозволяє створювати високочутливі датчики, здатні виявляти незначні зміни в навколишньому середовищі. Це особливо важливо для телекомунікацій, де точність і надійність передачі даних є критичними. Метаматеріали забезпечують можливість контролювати електромагнітні хвилі на рівні, недосяжному для звичайних матеріалів, що дозволяє розробляти нові типи антен, фільтрів та резонаторів з покращеними характеристиками.

Датчики на основі голографічного фазового градієнта забезпечують високу роздільну здатність та ефективність, що дозволяє використовувати їх у компактних і високопродуктивних системах вимірювання. Вони здатні точно аналізувати сигнал падаючого світла, що є надзвичайно корисним для біомедичних застосувань, де точність вимірювань відіграє вирішальну роль. Використання гіперболічних метаматеріалів та теорії ефективного середовища дозволяє створювати сенсори з високою чутливістю до змін у навколишньому середовищі. Ці матеріали можуть бути використані для моніторингу екологічних показників, біомедичних досліджень та в інших галузях, де необхідне точне виявлення найменших змін.

Гібридні структури та хвилевідні решітки відкривають нові можливості для покращення параметрів сенсорів. Вони дозволяють комбінувати різні типи матеріалів для досягнення нових рівнів продуктивності та ефективності. Такі структури можуть використовуватися в телекомунікаційних системах, де необхідні компактні та ефективні компоненти. Порушення симетрії в конструкції сенсорів дозволяє значно підвищити їх чутливість та селективність. Контрольоване порушення

симетрії створює умови для точного налаштування параметрів сенсора, що робить його надзвичайно ефективним у різних прикладних дослідженнях.

Датчики на основі Фано-резонансів забезпечують високий контраст сигналу, що дозволяє розробляти надчутливі сенсори для різних галузей науки та техніки. Ці резонанси використовуються для аналізу сигналів з високою точністю та надійністю, що є важливим для телекомунікацій та інших застосувань. Вимірювання показника заломлення за допомогою метаматеріалів дозволяє досягти високої точності та надійності вимірювань. Це відкриває нові можливості для розробки оптичних сенсорів, які можуть бути використані в біомедичних дослідженнях, екологічному моніторингу та інших сферах. Датчики на основі поверхнево-посиленого комбінаційного розсіювання (SERS) дозволяють виявляти найменші концентрації молекул, що робить їх незамінними для хімічних та біомедичних досліджень. Ці сенсори забезпечують високу чутливість і точність вимірювань, що є критичним для виявлення та аналізу біомолекул.

Отже, дослідження та розробка чутливих телекомунікаційних пристроїв на основі метаматеріалів є надзвичайно актуальною темою. Ці технології мають великий потенціал для покращення параметрів сучасних сенсорів, що сприятиме розвитку телекомунікацій, біомедичних досліджень, екологічного моніторингу та інших галузей. Подальший розвиток метаматеріалів та метаповерхонь відкриває нові перспективи для створення високочутливих, точних та надійних сенсорів, що є важливим кроком у розвитку сучасних технологій.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Обґрунтування вибору напрямку досліджень

Вибір напрямку досліджень пов'язаний з актуальністю та перспективністю використання сенсорів на базі метаматеріалів у сучасних телекомунікаційних пристроях. Метаматеріали, завдяки своїм унікальним властивостям, дозволяють створювати пристрої з характеристиками, які недосяжні для традиційних матеріалів. Зокрема, це стосується підвищеної чутливості, розширення діапазону частот та зменшення розмірів пристроїв.

Телекомунікаційні пристрої, засновані на метаматеріалах, мають величезний потенціал для поліпшення якості зв'язку, збільшення швидкості передачі даних і зниження енергоспоживання. Ці переваги роблять їх надзвичайно привабливими для використання в різних сферах, від мобільного зв'язку до військових застосувань і медичних діагностичних систем.

Вибір даного напрямку досліджень також обумовлений швидким розвитком технологій та необхідністю створення більш ефективних і надійних телекомунікаційних систем. Метаматеріали відкривають нові можливості для досягнення цих цілей завдяки своїм унікальним електромагнітним властивостям, які можуть бути точно налаштовані для виконання певних функцій.

2.2 Методи вирішення завдань дослідження

Для вирішення завдань дослідження був обраний електродинамічний метод проектування, який базується на використанні формул електродинаміки для моделювання та аналізу характеристик сенсорів на

базі метаматеріалів. Сенсори на базі метаматеріалів мають унікальні властивості, такі як висока чутливість до зовнішніх впливів та здатність працювати в широкому діапазоні частот, що робить їх надзвичайно перспективними для застосування в сучасних телекомунікаційних системах.

Електродинамічний метод дозволяє точно розраховувати параметри сенсорів та передбачати їхню поведінку при зміні різних параметрів. Цей метод включає розрахунки електричних і магнітних полів, які взаємодіють з метаматеріалами, що дозволяє моделювати їхні властивості з високою точністю. Застосування цього методу дає можливість детально аналізувати вплив різних факторів на характеристики сенсорів та оптимізувати їх для конкретних застосувань.

Крім того, електродинамічний метод проектування забезпечує врахування складних фізичних процесів, таких як резонансні явища та інтерференційні ефекти, що є ключовими для сенсорів на базі метаматеріалів. Це дозволяє досягти високої точності моделювання та підвищити надійність розроблених сенсорів.

2.3 Порівняльні оцінки методів

Електродинамічний метод проектування має ряд переваг перед іншими методами, такими як емпіричні або напівемпіричні методи, зокрема:

- Точність розрахунків, яка порівнянна з результатами професійних систем автоматизованого проектування (САПР). Ця точність досягається завдяки врахуванню всіх важливих фізичних процесів, таких як взаємодія електромагнітних хвиль з матеріалом, резонансні явища та інтерференційні ефекти. Наприклад, порівняння з системами типу HFSS (High Frequency Structure Simulator) показує,

що електродинамічний метод дозволяє отримати результати з похибкою не більше 5%, що є достатньо високим показником для більшості практичних застосувань.

- Можливість врахування складних фізичних процесів, що відбуваються в метаматеріалах. Це включає моделювання резонансних явищ, які є ключовими для роботи сенсорів на базі метаматеріалів, та інтерференційних ефектів, що дозволяють досягати високої чутливості та роздільної здатності.
- Гнучкість у використанні, яка дозволяє адаптувати метод під різні типи метаматеріалів та пристроїв. Це робить електродинамічний метод універсальним інструментом для розробки різноманітних телекомунікаційних пристроїв та сенсорів.

Порівняння з іншими методами, такими як емпіричні або напівемпіричні методи, показує, що електродинамічний метод дозволяє досягти порівняної точності при менших витратах часу на розрахунки та моделювання. Наприклад, емпіричні методи можуть вимагати тривалого експериментального дослідження для визначення параметрів, тоді як електродинамічний метод дозволяє провести всі необхідні розрахунки та моделювання на етапі проектування, що значно скорочує час розробки.

Таблиця 2.1.

Порівняння електродинамічного методу з іншими методами проектування

Параметр	Електродинамічний метод	Емпіричні методи	Напівемпіричні методи	Професійні САПР (HFSS)
Точність розрахунків	Висока, порівняна з професійними САПР (похибка до 5%)	Залежить від експериментальних даних	Залежить від кількості емпіричних параметрів	Висока, похибка до 5%
Час на розрахунки	Помірний, швидше ніж емпіричні методи	Тривалий, вимагає багато експериментів	Середній, вимагає менше експериментів	Високий, залежить від складності моделі
Врахування складних фізичних процесів	Так, враховує резонансні та інтерференційні явища	Частково, залежить від точності експериментів	Частково, залежить від моделі	Так, повне врахування всіх процесів
Гнучкість використання	Висока, адаптується під різні типи метаматеріалів	Низька, вимагає нових експериментів для кожного типу матеріалу	Середня, потребує змін у моделях	Висока, адаптується під різні типи метаматеріалів
Простота використання	Вимагає знань з електродинаміки та програмування	Простий у використанні, але вимагає багато експериментів	Середній, вимагає знань як емпіричних, так і теоретичних методів	Висока, інтерфейс користувача зручний

У результаті, точність розрахунків, що досягається електродинамічним методом, є порівнянною з результатами професійних САПР. Це підтверджує життєздатність розробленого програмного комплексу та його здатність до ефективного використання в практичних застосуваннях.

2.4 Розробка загальної методики проведення розрахунків

Загальна методика проведення розрахунків включає наступні етапи:

- Визначення початкових параметрів пристрою, таких як матеріальні властивості та робочий діапазон частот. Ці параметри визначаються на основі технічних вимог до пристрою та фізичних характеристик використовуваних матеріалів.
- Використання електродинамічних формул. Ці розрахунки дозволяють отримати детальну картину взаємодії електромагнітних хвиль з метаматеріалами і визначити оптимальні параметри для досягнення необхідних характеристик.
- Моделювання поведінки пристрою при зміні вхідних параметрів за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Це дозволяє провести аналіз чутливості пристрою до різних факторів та визначити найбільш впливові параметри.
- Аналіз отриманих результатів та їх порівняння з теоретичними очікуваннями. Це допомагає виявити можливі недоліки в моделі та внести необхідні коригування для покращення точності та надійності пристрою.
- Внесення коригувань в модель для досягнення необхідних характеристик. Це включає оптимізацію параметрів пристрою та повторний аналіз результатів до досягнення необхідного рівня характеристик.

2.5 Гіпотези та принцип дії розробленої апаратури

Гіпотеза, яка розглядається в даному дослідженні, полягає в тому, що використання детекторів на базі метаматеріалів у телекомунікаційних пристроях дозволяє значно покращити їхні характеристики, зокрема чутливість і діапазон частот.

Принцип дії розробленої апаратури базується на використанні ефекту Фано-резонансу, який виникає в результаті взаємодії між резонансними станами в метаматеріалах. Цей ефект дозволяє досягати високої чутливості при відносно низьких енергетичних витратах. Фано-резонанс виникає, коли два або більше резонансних станів взаємодіють, що призводить до утворення асиметричних ліній поглинання або розсіювання.

Ефект Фано-резонансу є ключовим для розроблених сенсорів, оскільки він дозволяє досягти високої роздільної здатності та чутливості до змін параметрів середовища. Це робить такі сенсори важливими для використання в телекомунікаційних системах, де висока чутливість і точність є критичними.

2.6 Фано-резонанси

Резонанси Фано визначаються як тип резонансного явища розсіювання, що призводить до асиметричної форми лінії. Ця асиметрична форма лінії зазвичай пояснюється інтерференцією між двома амплітудами розсіювання, одна з яких обумовлена розсіюванням у континуумі станів, а друга - збудженням дискретного стану, що означає резонансний процес. Пояснення резонансу Фано показано на рисунку 4а. Кожен осцилятор діє як порожнина і має власні частоти ω_1 і ω_2 , що відповідають порожнині 1 і 2, відповідно. Рівняння руху розв'язуються в термінах зміщень x_1 і x_2 від положень рівноваги:

$$m\ddot{x}_1 + \gamma_1\dot{x}_1 + \omega_1^2x_1 - \kappa^2x_2 = a_1e^{-j\omega t}, \quad m\ddot{x}_2 + \gamma_2\dot{x}_2 + \omega_2^2x_2 - \kappa^2x_1 = a_2e^{-j\omega t} \quad (2.1)$$

де κ - коефіцієнт зв'язку осциляторів, γ_1 і γ_2 - коефіцієнти демпфування. Розв'язок рівняння у стаціонарному режимі має вигляд

$$x_1 = a_1(\omega_2^2 - \omega^2 - j\gamma_2\omega) + a_2\kappa^2 \quad (2.2)$$

$$(\omega_1^2 - \omega^2 - j\gamma_1\omega)(\omega_2^2 - \omega^2 - j\gamma_2\omega) - \kappa^4 e^{j\omega t}, x_2 \quad (2.3)$$

$$= a_2(\omega_1^2 - \omega^2 - j\gamma_1\omega) + a_1\kappa^2 \quad (2.4)$$

$$(\omega_1^2 - \omega^2 - j\gamma_1\omega)(\omega_2^2 - \omega^2 - j\gamma_2\omega) - \kappa^4 e^{j\omega t} \quad (2.5)$$

У цій класичній гармонійній моделі резонанс Фано зазвичай виникає, коли вхідна ЕМ хвиля збуджує лише широку моду x_1 , тоді як вузька резонансна мода x_2 збуджується лише завдяки зв'язку. Ця ситуація означає, що тільки одна порожнина безпосередньо керується ЕМ хвилею, де a_2 дорівнює нулю. Тим часом, у випадку, коли ЕМ хвиля збуджує як широку, так і вузьку моди, де a_2 не дорівнює нулю, форма лінії Фано також з'являється і навіть стає гострішою. На рисунку 4б показано різницю між цими двома випадками.

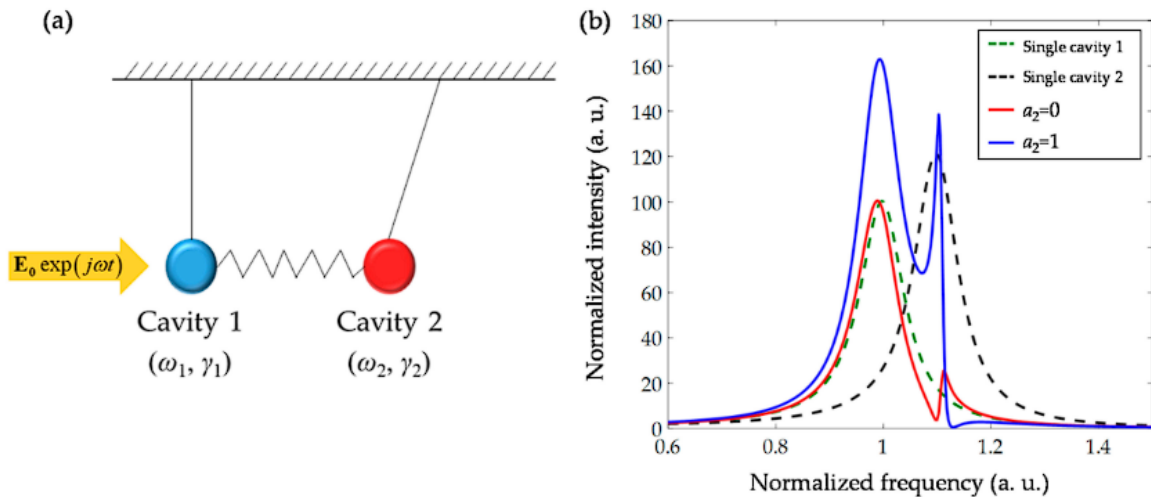


Рис 2.1. (а) Схематичне зображення класичних зв'язаних осциляторів.

Два осцилятори пов'язані гармонічним потенціалом;

(б) Реальні значення x_2 у рівнянні (2). Кожна крива відноситься до випадків, коли $a_2 = 0$ (червона лінія) і $a_2 = 1$ (синя лінія), відповідно.

Цей резонансний процес вперше був вивчений в атомній фізиці та квантовій механіці, але останнім часом він активно досліджується в наночастинках або плазмонних наноструктурах та ММ завдяки своїм унікальним оптичним властивостям, таким як сильне підсилення поля та надзвичайно вузька асиметрична лінійна ширина. Зокрема, надвисока добротність підходить для сенсорних застосувань, оскільки вузька лінійна ширина дозволяє виявляти нижчу молекулярну концентрацію і досягати вищої чутливості в навколишньому середовищі. Приклад застосування датчика Fano резонансу представлено на рисунку 5. Незважаючи на те, що існує велика кількість різноманітних сенсорів для визначення товщини шару, температури, хімічних речовин, сфера застосування цього розділу обмежується лише РІ-сенсорами на основі резонансів Фано в ММ. Далі розглядаються струмові сенсори на основі резонансів Фано.

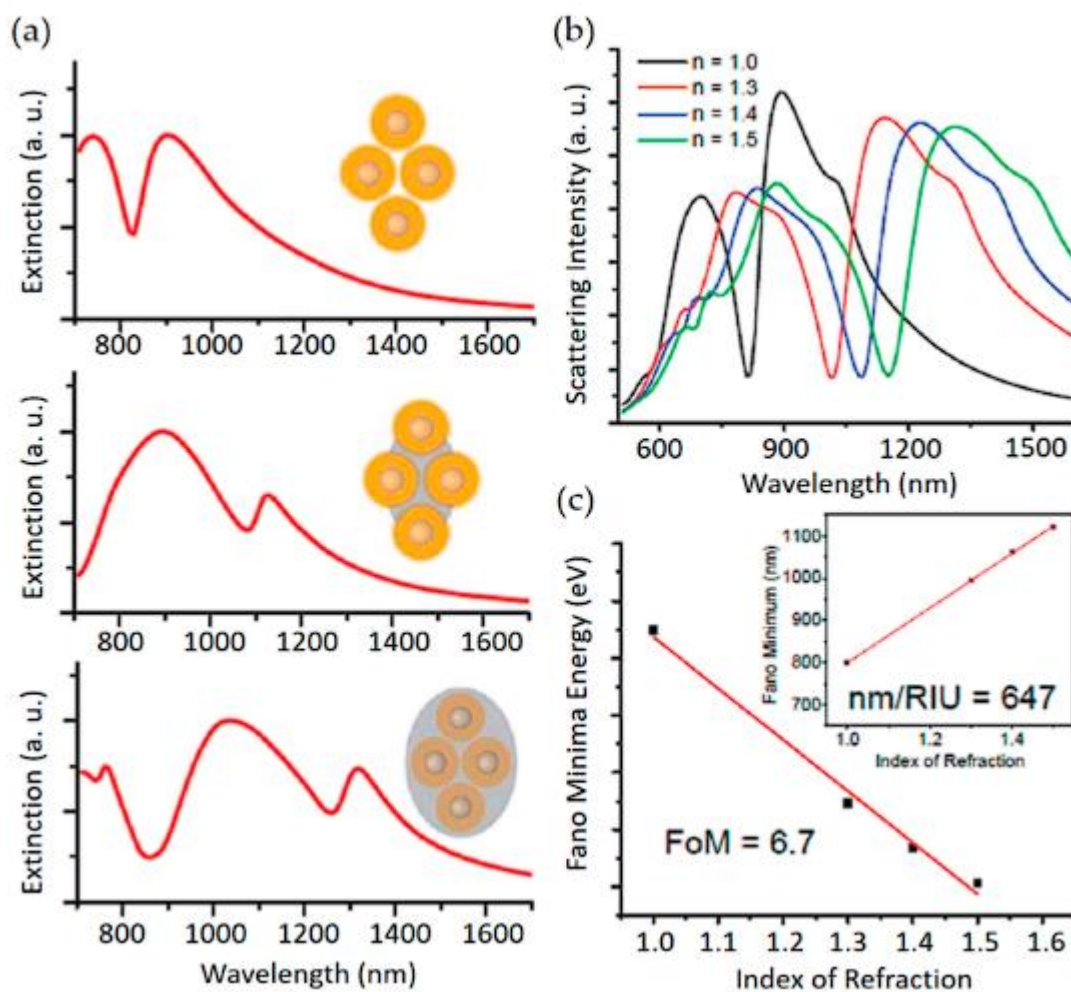


Рис 2.2 . Розраховані спектри квадрумерів у різних діелектричних середовищах.

- (а) Провал резонансу Фано дуже чутливий до оточення;
- (б) Спектри розсіювання квадрумера, поміщеного в середовища з різним показником заломлення;
- (в) Розрахований показник добротності. Показано розраховану чутливість 647 нм/RIU.

2.7 Порухення симетрії

Загальним методом, що дозволяє легко отримати резонанс Фано в плазмоніці, є порушення симетрії наноструктур. Для наноструктур, розміри яких малі порівняно з довжиною хвилі падаючого світла, можна збуджувати дипольні моменти, і їхній спектральний профіль за диполями, як правило, є широким. Перше спостереження резонансу Фано в НМ було зроблено

групою Н. І. Желудєвим у мікрохвильовому діапазоні частот. В елементарній комірковій структурі ММ були використані асиметричні розщеплені кільця (ASR), які виконують роль резонатора. Порухення симетрії дозволяє збуджувати «вузькі» темні моди, які викликані коливаннями вищих порядків, і взаємодіяти з широкими «світлими» модами. Як показано на рисунку 6b, час життя темної моди залежить від ступеня асиметрії γ і тангенса кута втрат на підкладці ϵ , а сильний резонанс Фано був отриманий при зміні двох параметрів. З подібною структурою група W. Zhang отримала гостріший пік резонансу Фано в терагерцовому діапазоні частот а також досягла рівня 57 000 нм/RIU, використовуючи тонші підкладки. Зондування в ближньому інфрачервоному діапазоні частот також було досягнуто за допомогою структури ASR, яка була вдосконалена до щілинного типу на основі ММ з вуглецевих нанотрубок.

Нещодавно повідомлялося про низку інших планарних ММ з порушенням симетрії. На оптичних частотах продемонстрували різкі піки відбиття з ЕМ-індукованою прозорістю (ЕІП), яка відома як усунення поглинання через квантову інтерференцію в атомному середовищі. Оскільки відомо, що явище ЕІП може виникати в класичній системі, коли оптичні резонатори з'єднані один з одним, вони запропонували конструкцію, що складається з асиметрично розташованих трьох нанощілин в шарі золота для простоти виготовлення. Вони підтвердили, що запропонований датчик показав чутливість 588 нм/RIU і коефіцієнт корисної дії (FOM) 5,3, представлений Шеррі та ін. Y. Moritake та ін. експериментально продемонстрували гострий резонанс Фано, найвища добротність якого становить 7,34, використовуючи асиметричні подвійні смужки. У випадку інфрачервоних частот С. Wu та ін. розробили інфрачервоні плазмонні ММ і запропонували їх використання як платформи для біосенсорики. Як показано на рисунку 6d, була використана

асиметрична π -подібна нанострижнева антена і визначені її структурні параметри для керування довжиною хвилі субрадіанного резонансу. Вони продемонстрували біосенсибілізацію та дактилоскопію білків-мішеней, протестувавши її на чітко визначеному ультратонкому мультибілковому шарі. У терагерцовому діапазоні частот Б. Рейнхард та ін. порушили симетрію, нахиливши хрести і отримавши вузьку форму лінії.

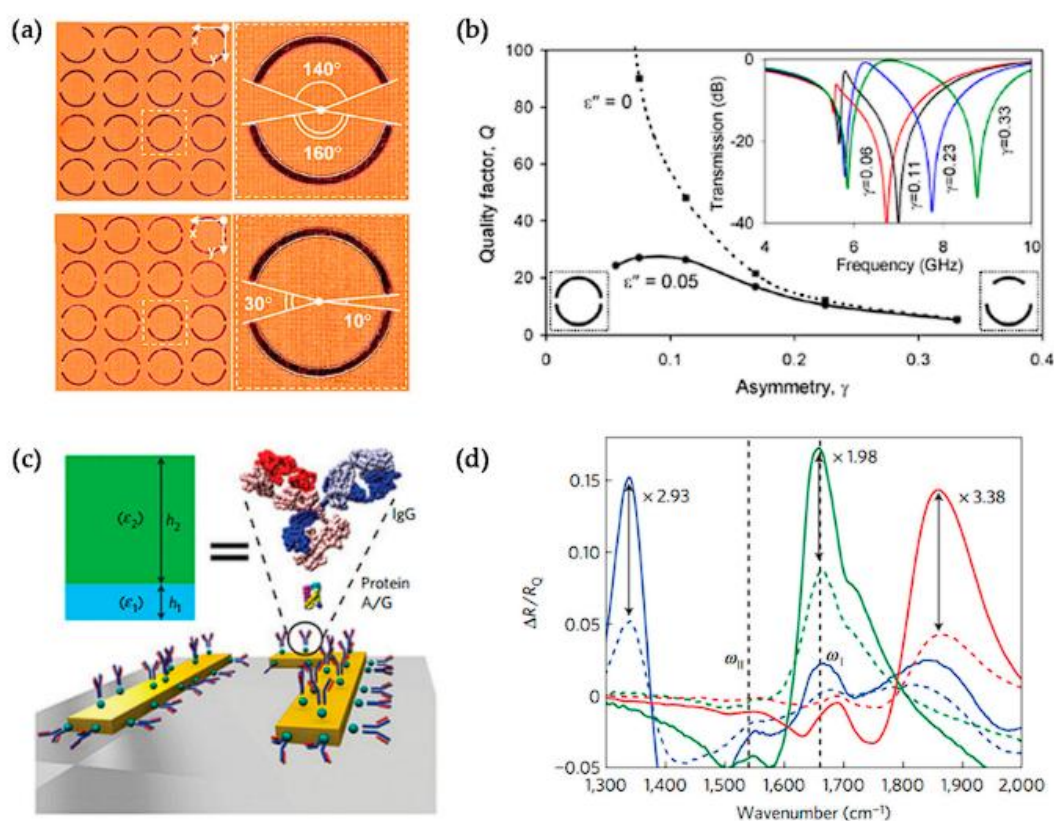


Рис 2.3. (а) Планарні ММ з асиметричними розщепленими мідними кільцями. Штрихові рамки вказують на одноклітинну (б) Добротність резонансу «пасткової моди» як функція асиметрії частинок γ , визначений як відносна різниця довжин дуг; (с) Схематичне зображення моно- та бішару білків, що зв'язуються з та бішару білків, що зв'язуються з поверхнею металу, та еквівалентна модель діелектрика;

2.8 Формули та фізичний зміст параметрів

У процесі моделювання та розрахунків використовувалися такі основні формули:

$$\begin{aligned}K_e &= \frac{K_1}{1+(x+a_1) \cdot i \cdot b_1} + \frac{K_3}{1+(x+a_3) \cdot i \cdot b_3} \\K_m &= \frac{K_2}{1+(x-a_2) \cdot i \cdot b_2} + \frac{K_4}{1+(x-a_4) \cdot i \cdot b_4} \\T &= 1 - \frac{K_m}{1+K_m} - \frac{K_e}{1+K_e} \\\text{Mag}T &= 20 \cdot \log_{10}(|T|) \\\text{phase}T &= \arg(T) \\G &= \frac{K_e}{1+K_e} - \frac{K_m}{1+K_m} \\\text{Mag}G &= 20 \cdot \log_{10}(|G|) \\\text{phase}G &= \arg(G) \\GVZ &= -\frac{\partial \text{phase}T}{\partial x}\end{aligned}$$

Рис 2.4. Основні Формули

де:

K_e та K_m — електрична та магнітна складові електромагнітних коливань, відповідно;

K_1, K_2, K_3, K_4 — коефіцієнти зв'язку;

a_1, a_2, a_3, a_4 — коефіцієнти, що визначають положення резонансів;

b_1, b_2, b_3, b_4 — добротності, що визначають ширину резонансів;

x — змінна, що описує частоту;

i — уявна одиниця;

T — передавальна функція;

$\text{Mag}T$ — амплітудно-частотна характеристика передавальної функції в децибелах;

$\text{phase}T$ — фазова характеристика передавальної функції;

G — функція резонансної взаємодії;

$\text{Mag}G$ — амплітудно-частотна характеристика резонансної взаємодії в децибелах;

$\text{phase}G$ — фазова характеристика резонансної взаємодії;

GVZ — груповий час затримки, що описує зміну фази передавальної функції.

Фізичний зміст параметрів полягає в тому, що вони описують взаємодію електромагнітних хвиль з метаматеріалом, включаючи резонансні явища та інтерференційні ефекти. Ці параметри дозволяють моделювати та аналізувати поведінку телекомунікаційних пристроїв на основі метаматеріалів, оцінювати їх ефективність та розробляти нові типи пристроїв з покращеними характеристиками.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ

Мета цієї роботи полягає у розробці програмного комплексу для дослідження чутливих телекомунікаційних пристроїв (детекторів) на базі метаматеріалів. Метаматеріали – це штучно створені матеріали, які мають унікальні електромагнітні властивості, що не зустрічаються в природі. Вони дозволяють створювати високочутливі телекомунікаційні пристрої з покращеними характеристиками.

3.1. Опис розробки програми

Постановка задачі

Метою роботи є створення програмного забезпечення, яке дозволяє моделювати роботу чутливих телекомунікаційних пристроїв на базі метаматеріалів. Програма повинна забезпечувати введення параметрів, виконання моделювання та візуалізацію результатів.

Вибір інструментів і технологій

Для розробки програми були обрані наступні інструменти:

- **JavaFX** – для створення графічного інтерфейсу користувача.
- **MATLAB** – для виконання обчислень та моделювання.

JavaFX є потужним інструментом для створення кросплатформних графічних додатків з багатими можливостями для візуалізації даних. **MATLAB** є провідним програмним середовищем для чисельних обчислень і моделювання, що дозволяє легко інтегрувати складні математичні моделі в програму.

Архітектура програми

Програмний комплекс складається з шістьох основних компонентів:

1. **DiplomApp** – головний клас програми, який відповідає за запуск та ініціалізацію інтерфейсу.
2. **MATLABConnector** – клас для взаємодії з MATLAB, що забезпечує передачу даних та отримання результатів моделювання.
3. **MainController** – клас-контролер, який обробляє дії користувача, запускає моделювання та оновлює графіки результатів.
4. **main.fxml** - файл конфігурації інтерфейсу користувача.
5. **style.css** - файл стилів для налаштування вигляду графіків.
6. **calculate.m** - матлаб-скрипт для обчислення параметрів

Використані формули та скрипти

Для обчислення параметрів телекомунікаційних пристроїв використовувалися формули (рис 2.4) та MATLAB скрипт:

MATLAB скрипт (calculate.m):

```
function [MagT, phaseT, MagG, phaseG, GVZ] = calculate(X, a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3, b4, K1, K2, K3, K4)
```

```
% Ke и Km
```

```
Ke = K1 ./ (1 + (X + a1) * 1i * b1) + K3 ./ (1 + (X + a3) * 1i * b3);
```

```
Km = K2 ./ (1 + (X - a2) * 1i * b2) + K4 ./ (1 + (X - a4) * 1i * b4);
```

```
% T
```

```
T = 1 - Km ./ (1 + Km) - Ke ./ (1 + Ke);
```

```
% MagT и phaseT
```

```

MagT = 20 * log10(abs(T));
phaseT = angle(T);

% G
G = Ke ./ (1 + Ke) - Km ./ (1 + Km);
% MagG и phaseG
MagG = 20 * log10(abs(G));

phaseG = angle(G);

% GVZ
GVZ = -diff(phaseT);

end

```

Результати роботи

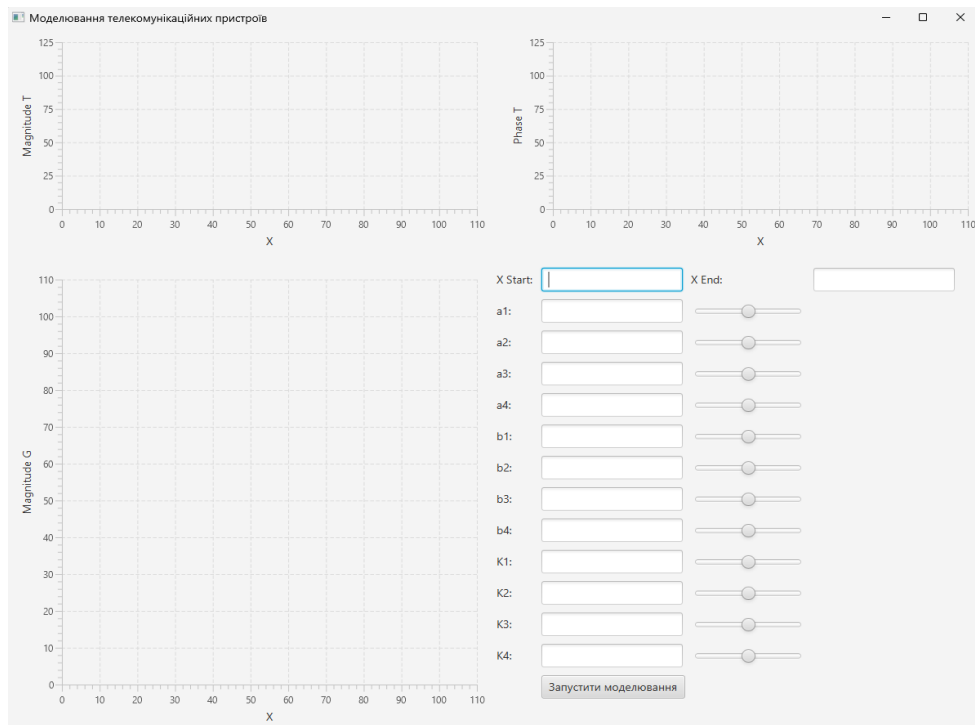


Рис3.1 Фінальний вигляд програмного комплексу:

Приклади виконання програми

Для ілюстрації роботи програми, розглянемо кілька прикладів її використання з різними параметрами.

Приклад 1:

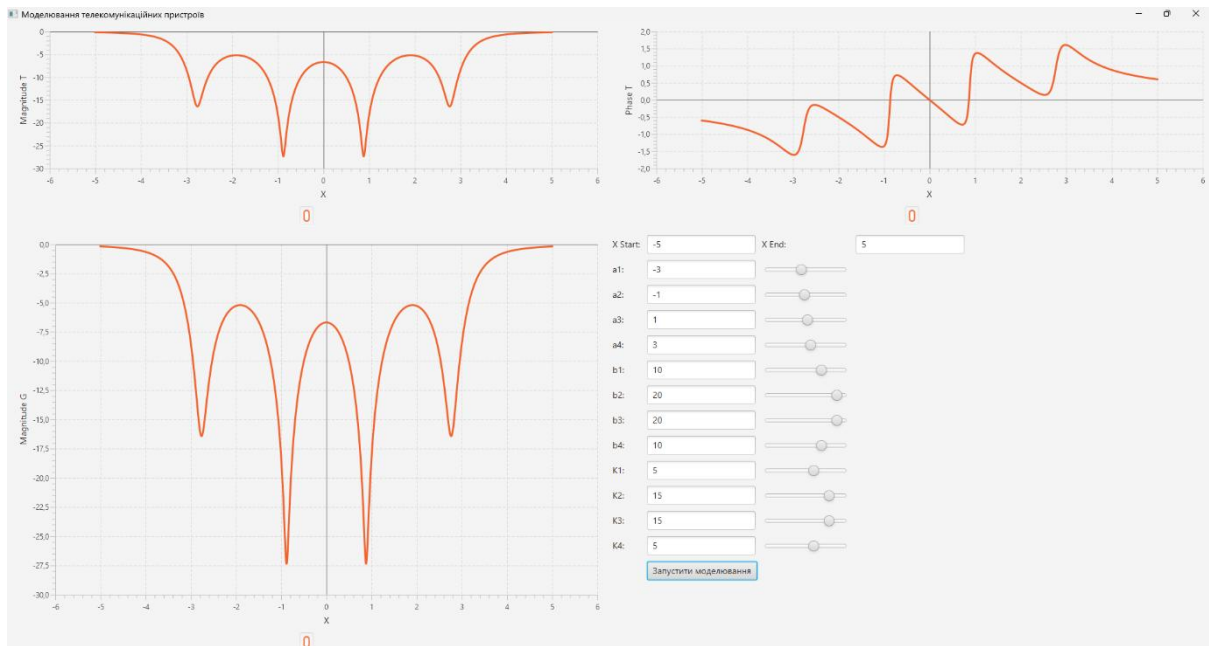


Рис 3.2 Приклад 1

На прикладі 1 видно графіки, отримані з параметрами:

- X Start: -5
- X End: 5
- a1: -3
- a2: -1
- a3: 1
- a4: 3
- b1: 10
- b2: 20
- b3: 20
- b4: 10
- K1: 5
- K2: 15
- K3: 15
- K4: 5

Приклад 2:

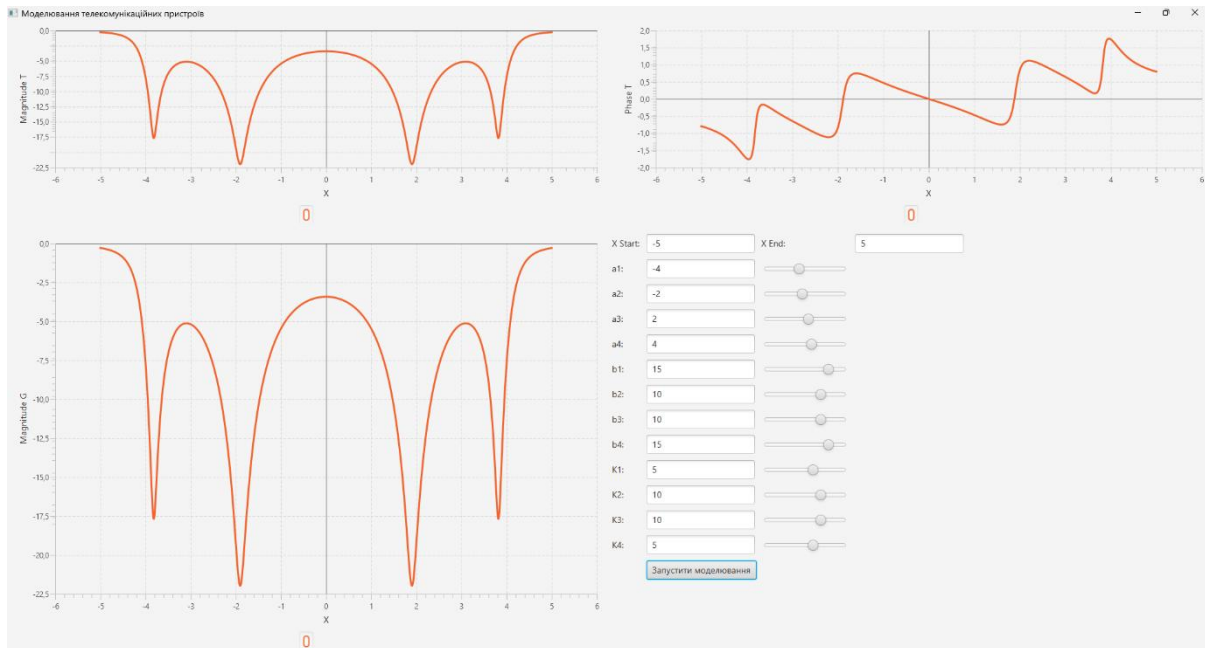


Рис 3.3 Приклад 2

На прикладі 2 показано вхідні параметри:

- X Start: -5
- X End: 5
- a1: -4
- a2: -2
- a3: 2
- a4: 4
- b1: 15
- b2: 10
- b3: 10
- b4: 15
- K1: 5
- K2: 10
- K3: 10
- K4: 5

3.2. Тестування

План тестування

Для забезпечення якості програмного комплексу було розроблено план тестування, що включає наступні етапи:

- **Модульне тестування** - тестування окремих компонентів системи для перевірки їхньої коректності.
- **Інтеграційне тестування** - перевірка взаємодії між різними компонентами системи.
- **Системне тестування** - тестування всієї системи в цілому для перевірки відповідності вимогам.
- **Тестування продуктивності** - оцінка швидкості та ефективності роботи програми при різних навантаженнях.

Результати тестування

Під час тестування було виявлено та виправлено наступні помилки:

- **Помилка взаємодії з MATLAB:**
 - Опис: Програма не завжди коректно взаємодіяла з MATLAB через неправильний шлях до скрипту.
 - Виправлення: Було уточнено шлях до скрипту та додано обробку виключень.
- **Некоректне відображення графіків:**
 - Опис: Графіки не відображалися при певних значеннях параметрів.

- виправлення: Було додано перевірку значень параметрів та виправлено логіку оновлення графіків.

- **Проблеми з інтерфейсом користувача:**

- Опис: Поля введення та повзунки не синхронізувалися.
- виправлення: Було виправлено механізм синхронізації значень між полями введення та повзунками.

Висновок

Програма дозволяє моделювати та аналізувати параметри пристроїв, надаючи зручний графічний інтерфейс для введення параметрів та візуалізації результатів.

Досягнуті результати:

- Створено програмний комплекс, який взаємодіє з MATLAB для виконання складних обчислень.
- Реалізовано зручний інтерфейс користувача для введення параметрів та відображення результатів.
- Проведено тестування програми, виявлено та виправлено помилки.

Перспективи подальшого розвитку програми включають додавання нових функцій для більш детального аналізу пристроїв, а також оптимізацію роботи програми для покращення її продуктивності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У ході виконання дипломної роботи було досягнуто значних результатів, що мають важливе значення для дослідження та розробки сучасних телекомунікаційних пристроїв.

Першочергово було проведено детальний аналіз літературних джерел та існуючих підходів до дослідження метаматеріалів та їх застосування в телекомунікаційних пристроях. Було визначено ключові характеристики метаматеріалів, такі як негативний показник заломлення, та їх вплив на роботу телекомунікаційних пристроїв. На основі цього аналізу було розроблено концептуальну модель програмного комплексу, що дозволяє здійснювати моделювання та аналіз чутливих телекомунікаційних пристроїв.

Основним етапом роботи стало розроблення програмного комплексу, що включає графічний інтерфейс користувача, модуль для взаємодії з MATLAB, а також механізми обробки та візуалізації даних. Було використано сучасні програмні засоби та технології, зокрема мову програмування Java, бібліотеки JavaFX для створення графічного інтерфейсу, а також MATLAB для проведення складних математичних розрахунків. Особлива увага приділялася зручності використання програмного комплексу, що дозволяє користувачам легко вводити параметри та отримувати результати у вигляді графіків.

Програма була піддана ретельному тестуванню на різних етапах розробки. Модульне тестування дозволило перевірити окремі компоненти системи на коректність роботи, інтеграційне тестування забезпечило перевірку взаємодії між компонентами, а системне тестування дало змогу оцінити роботу всієї системи в цілому. Крім того, проводилося тестування продуктивності для оцінки швидкості роботи програми при різних

навантаженнях. Результати тестування свідчать про високу якість програмного забезпечення, що було підтверджено виявленням та виправленням кількох критичних помилок.

Перспективи подальшого розвитку: На основі отриманих результатів були сформульовані рекомендації щодо подальшого розвитку програмного комплексу. Серед перспективних напрямів можна відзначити:

- Додавання нових функцій для більш детального аналізу та моделювання телекомунікаційних пристроїв.
- Оптимізація програмного коду для покращення продуктивності та зменшення часу обробки даних.
- Інтеграція з іншими програмними засобами та платформами для розширення функціональних можливостей комплексу.
- Розробка навчальних матеріалів та посібників для користувачів, що допоможе у більш ефективному використанні програмного комплексу в науковій та інженерній практиці.

Розроблений програмний комплекс є важливим кроком у розвитку досліджень чутливих телекомунікаційних пристроїв на базі метаматеріалів. Він забезпечує нові можливості для моделювання та аналізу, що сприяє подальшому прогресу в цій галузі. Виконана робота демонструє високу якість розробленого програмного забезпечення та його значний потенціал для подальшого вдосконалення та використання в практичній діяльності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. "Metamaterials and Metasurfaces for Sensor Applications" by Yohan Lee, Sun-Je Kim, Hyeonsoo Park ID and Byoungcho Lee
2. "Planar Metamaterial Based Microwave Sensor Arrays for Biomedical Analysis and Treatment" by Margarita Puentes Vargas
3. "Metamaterials: Physics and Engineering Explorations" by Nader Engheta and Richard W. Ziolkowski
4. "Metamaterials: Theory, Design, and Applications" by David R. Smith, Willie J. Padilla, and Dimitri N. Basov
5. "Metamaterials: A New Frontier of Science and Technology" by Mikhail Lapine, Elena Semouchkina, and Kan Yao
6. "Introduction to Metamaterials" by Gennady Shvets and Ilya V. Shadrivov
7. Smith, D. R., Pendry, J. B., & Wiltshire, M. C. K. (2004). Metamaterials and negative refractive index. *Science*, 305(5685), 788-792.
8. Engheta, N., & Ziolkowski, R. W. (Eds.). (2006). *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*. John Wiley & Sons.
9. Pendry, J. B., Schurig, D., & Smith, D. R. (2006). Controlling electromagnetic fields. *Science*, 312(5781), 1780-1782.
10. Caloz, C., & Itoh, T. (2005). *Electromagnetic metamaterials: Transmission line theory and microwave applications*. John Wiley & Sons.
11. Eleftheriades, G. V., & Balmain, K. G. (2005). *Negative-Refraction Metamaterials: Fundamental Principles and Applications*. John Wiley & Sons.
12. Holloway, C. L., Kuester, E. F., Gordon, J. A., O'Hara, J., Booth, J., & Smith, D. R. (2012). An overview of the theory and applications of metasurfaces: The two-dimensional equivalents of metamaterials. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 54(2), 10-35.

13. Liu, Y., & Zhang, X. (2011). Metamaterials: a new frontier of science and technology. *Chemical Society Reviews*, 40(5), 2494-2507.
14. Schurig, D., Mock, J. J., Justice, B. J., Cummer, S. A., Pendry, J. B., Starr, A. F., & Smith, D. R. (2006). Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*, 314(5801), 977-980.
15. Valentine, J., Zhang, S., Zentgraf, T., Ulin-Avila, E., Genov, D. A., Bartal, G., & Zhang, X. (2008). Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index. *Nature*, 455(7211), 376-379.
16. Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., & Padilla, W. J. (2008). Perfect metamaterial absorber. *Physical Review Letters*, 100(20), 207402.

Лістинг програми

Клас DiplomApp

```
package com.example.diplom3;

import javafx.application.Application;
import javafx.fxml.FXMLLoader;
import javafx.scene.Scene;
import javafx.stage.Stage;

public class DiplomApp extends Application {

    @Override
    public void start(Stage primaryStage) {
        try {
            FXMLLoader loader = new
FXMLLoader(getClass().getResource("/main.fxml"));
            Scene scene = new Scene(loader.load());
            primaryStage.setTitle("Моделювання
телекомунікаційних пристроїв");
            primaryStage.setScene(scene);
            primaryStage.show();
        } catch (Exception e) {
            e.printStackTrace();
        }
    }
}
```

```

        public static void main(String[] args) {
            launch(args);
        }
    }
}

```

Клас MatlabConnector

```

package com.example.diplom3;

import com.mathworks.engine.EngineException;
import com.mathworks.engine.MatlabEngine;

import java.util.concurrent.ExecutionException;

public class MATLABConnector {
    private MatlabEngine matlabEngine;

    public MATLABConnector() throws
    EngineException, InterruptedException {
        matlabEngine = MatlabEngine.startMatLab();
    }

    public double[][] runSimulation(double[] X, double a1,
    double a2, double a3, double a4, double b1, double b2,
    double b3, double b4, double K1, double K2, double K3,
    double K4) throws ExecutionException, InterruptedException
    {

```

```

matlabEngine.putVariable("X", X);
matlabEngine.putVariable("a1", a1);
matlabEngine.putVariable("a2", a2);
matlabEngine.putVariable("a3", a3);
matlabEngine.putVariable("a4", a4);
matlabEngine.putVariable("b1", b1);
matlabEngine.putVariable("b2", b2);
matlabEngine.putVariable("b3", b3);
matlabEngine.putVariable("b4", b4);
matlabEngine.putVariable("K1", K1);
matlabEngine.putVariable("K2", K2);
matlabEngine.putVariable("K3", K3);
matlabEngine.putVariable("K4", K4);

```

```

matlabEngine.eval("cd 'C:\\Users\\Oleksii
Pshenychnyi\\IdeaProjects\\Diplom3\\src\\'");
matlabEngine.eval("[MagT, phaseT, MagG, ~, ~] =
calculate(X, a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3, b4, K1, K2, K3,
K4);");

```

```

double[] MagT = matlabEngine.getVariable("MagT");
double[] phaseT =
matlabEngine.getVariable("phaseT");
double[] MagG = matlabEngine.getVariable("MagG");

matlabEngine.close();

```

```

        return new double[][]{MagT, phaseT, MagG};
    }

    public void close() throws EngineException {
        if (matlabEngine != null) {
            matlabEngine.close();
        }
    }
}

```

Клас MainController

```

package com.example.diplom3.controller;

import com.example.diplom3.MATLABConnector;
import javafx.fxml.FXML;
import javafx.scene.chart.LineChart;
import javafx.scene.chart.XYChart;
import javafx.scene.control.Slider;
import javafx.scene.control.TextField;
public class MainController {
    @FXML
    private TextField inputXStart;
    @FXML
    private TextField inputXEnd;
    @FXML
    private TextField inputA1;
    @FXML
    private TextField inputA2;
}

```

```
@FXML
private TextField inputA3;
@FXML
private TextField inputA4;
@FXML
private TextField inputB1;
@FXML
private TextField inputB2;
@FXML
private TextField inputB3;
@FXML
private TextField inputB4;
@FXML
private TextField inputK1;
@FXML
private TextField inputK2;
@FXML
private TextField inputK3;
@FXML
private TextField inputK4;
@FXML
private Slider sliderXStart;
@FXML
private Slider sliderXEnd;
@FXML
private Slider sliderA1;
@FXML
private Slider sliderA2;
```

```

@FXML
private Slider sliderA3;
@FXML
private Slider sliderA4;
@FXML
private Slider sliderB1;
@FXML
private Slider sliderB2;
@FXML
private Slider sliderB3;
@FXML
private Slider sliderB4;
@FXML
private Slider sliderK1;
@FXML
private Slider sliderK2;
@FXML
private Slider sliderK3;
@FXML
private Slider sliderK4;
@FXML
private LineChart<Number, Number> chartMagT;
@FXML
private LineChart<Number, Number> chartPhaseT;
@FXML
private LineChart<Number, Number> chartMagG;

@FXML

```

```

    public void handleSimulation() {
        try {
            double xStart =
Double.parseDouble(inputXStart.getText());
            double xEnd =
Double.parseDouble(inputXEnd.getText());
            double[] X = new double[(int)(xEnd - xStart) *
200];

            for (int i = 0; i < X.length; i++) {
                X[i] = xStart + i * (xEnd - xStart) /
(X.length - 1);
            }

            double a1 =
Double.parseDouble(inputA1.getText());
            double a2 =
Double.parseDouble(inputA2.getText());
            double a3 =
Double.parseDouble(inputA3.getText());
            double a4 =
Double.parseDouble(inputA4.getText());
            double b1 =
Double.parseDouble(inputB1.getText());
            double b2 =
Double.parseDouble(inputB2.getText());
            double b3 =
Double.parseDouble(inputB3.getText());
            double b4 =

```

```

Double.parseDouble(inputB4.getText());
        double K1 =
Double.parseDouble(inputK1.getText());
        double K2 =
Double.parseDouble(inputK2.getText());
        double K3 =
Double.parseDouble(inputK3.getText());
        double K4 =
Double.parseDouble(inputK4.getText());
MATLABConnector connector = new MATLABConnector();
        double[][] results =
connector.runSimulation(X, a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3, b4,
K1, K2, K3, K4);

        double[] MagT = results[0];
        double[] phaseT = results[1];
        double[] MagG = results[2];

double[] MagT_dB = new double[MagT.length]
for (int i = 0; i < MagT.length; i++) {
        MagT_dB[i] = 20 *
Math.Log10(Math.abs(MagT[i]));
    }

        updateChart(chartMagT, X, MagT_dB); //
Используем преобразованные значения
        updateChart(chartPhaseT, X, phaseT);
        updateChart(chartMagG, X, MagG);

```

```

        connector.close();
    } catch (Exception e) {
        e.printStackTrace();
    }
}

private void updateChart(LineChart<Number, Number>
chart, double[] x, double[] data) {
    XYChart.Series<Number, Number> series = new
XYChart.Series<>();
    for (int i = 0; i < data.length; i++) {
        series.getData().add(new XYChart.Data<>(x[i],
data[i]));
    }
    chart.getData().clear();
    chart.getData().add(series);

    for (XYChart.Data<Number, Number> item :
series.getData()) {
        item.getNode().setVisible(false);
    }
}

@FXML
private void updateXStart() {

sliderXStart.setValue(Double.parseDouble(inputXStart.getTe
xt()));

```

```

    }

    @FXML
    private void updateXStartSlider() {

inputXStart.setText(Double.toString/sliderXStart.getValue(
)));
    }

    @FXML
    private void updateXEnd() {

sliderXEnd.setValue(Double.parseDouble(inputXEnd.getText(
)));
    }

    @FXML
    private void updateXEndSlider() {

inputXEnd.setText(Double.toString/sliderXEnd.getValue()));
    }

    @FXML
    private void updateA1() {

sliderA1.setValue(Double.parseDouble(inputA1.getText()));
    }

    @FXML

```

```

        private void updateA1Slider() {

inputA1.setText(Double.toString/sliderA1.getValue()));
        }

@FXML
        private void updateA2() {

sliderA2.setValue(Double.parseDouble(inputA2.getText()));
        }

@FXML
        private void updateA2Slider() {

inputA2.setText(Double.toString/sliderA2.getValue()));
        }

@FXML
        private void updateA3() {

sliderA3.setValue(Double.parseDouble(inputA3.getText()));
        }

@FXML
        private void updateA3Slider() {

inputA3.setText(Double.toString/sliderA3.getValue()));
        }

```

```
@FXML
private void updateA4() {

sliderA4.setValue(Double.parseDouble(inputA4.getText()));
}
```

```
@FXML
private void updateA4Slider() {

inputA4.setText(Double.toString(sliderA4.getValue()));
}
```

```
@FXML
private void updateB1() {

sliderB1.setValue(Double.parseDouble(inputB1.getText()));
}
```

```
@FXML
private void updateB1Slider() {

inputB1.setText(Double.toString(sliderB1.getValue()));
}
```

```
@FXML
private void updateB2() {

sliderB2.setValue(Double.parseDouble(inputB2.getText()));
}
```

```

@FXML
private void updateB2Slider() {

inputB2.setText(Double.toString/sliderB2.getValue()));
}

@FXML
private void updateB3() {

sliderB3.setValue(Double.parseDouble(inputB3.getText()));
}

@FXML
private void updateB3Slider() {

inputB3.setText(Double.toString/sliderB3.getValue()));
}

@FXML
private void updateB4() {

sliderB4.setValue(Double.parseDouble(inputB4.getText()));
}

@FXML
private void updateB4Slider() {

inputB4.setText(Double.toString/sliderB4.getValue()));
}

```

```

    }

    @FXML
    private void updateK1() {

sliderK1.setValue(Double.parseDouble(inputK1.getText()));
    }

    @FXML
    private void updateK1Slider() {

inputK1.setText(Double.toString(sliderK1.getValue()));
    }

    @FXML
    private void updateK2() {

sliderK2.setValue(Double.parseDouble(inputK2.getText()));
    }

    @FXML
    private void updateK2Slider() {

inputK2.setText(Double.toString(sliderK2.getValue()));
    }

    @FXML
    private void updateK3() {

```

```
sliderK3.setValue(Double.parseDouble(inputK3.getText()));  
}
```

```
@FXML
```

```
private void updateK3Slider() {
```

```
inputK3.setText(Double.toString(sliderK3.getValue()));  
}
```

```
@FXML
```

```
private void updateK4() {
```

```
sliderK4.setValue(Double.parseDouble(inputK4.getText()));  
}
```

```
@FXML
```

```
private void updateK4Slider() {
```

```
inputK4.setText(Double.toString(sliderK4.getValue()));  
}  
}
```

Main.fxml

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
```

```
<?import javafx.geometry.Insets?>
```

```
<?import javafx.scene.chart.LineChart?>
```

```
<?import javafx.scene.chart.NumberAxis?>
```

```

<?import javafx.scene.control.Button?>
<?import javafx.scene.control.Label?>
<?import javafx.scene.control.Slider?>
<?import javafx.scene.control.TextField?>
<?import javafx.scene.layout.ColumnConstraints?>
<?import javafx.scene.layout.GridPane?>
<?import javafx.scene.layout.RowConstraints?>
<?import javafx.scene.layout.VBox?>

<GridPane alignment="CENTER" hgap="10" vgap="10"
xmlns="http://javafx.com/javafx/8"
xmlns:fx="http://javafx.com/fxml/1"
fx:controller="com.example.diplom3.controller.MainController">
    <columnConstraints>
        <ColumnConstraints percentWidth="50"/>
        <ColumnConstraints percentWidth="50"/>
    </columnConstraints>
    <rowConstraints>
        <RowConstraints percentHeight="33.3"/>
        <RowConstraints percentHeight="33.3"/>
        <RowConstraints percentHeight="33.3"/>
    </rowConstraints>

    <LineChart fx:id="chartMagT" GridPane.rowIndex="0"
GridPane.columnIndex="0" prefHeight="300">
        <xAxis>
            <NumberAxis label="X"/>
        </xAxis>

```

```

        <yAxis>
            <NumberAxis label="Magnitude T"/>
        </yAxis>
    </LineChart>
    <LineChart fx:id="chartPhaseT" GridPane.rowIndex="0"
GridPane.columnIndex="1" prefHeight="300">
        <xAxis>
            <NumberAxis label="X"/>
        </xAxis>
        <yAxis>
            <NumberAxis label="Phase T"/>
        </yAxis>
    </LineChart>

    <!-- График Magnitude G -->
    <LineChart fx:id="chartMagG" GridPane.rowIndex="1"
GridPane.columnIndex="0" prefHeight="300"
GridPane.rowSpan="2">
        <xAxis>
            <NumberAxis label="X"/>
        </xAxis>
        <yAxis>
            <NumberAxis label="Magnitude G"/>
        </yAxis>
    </LineChart>

    <VBox spacing="10" GridPane.rowIndex="1"
GridPane.columnIndex="1" GridPane.rowSpan="2">
        <GridPane hgap="10" vgap="10">

```

```

        <Label text="X Start:" GridPane.rowIndex="0"
GridPane.columnIndex="0"/>
        <TextField fx:id="inputXStart"
GridPane.rowIndex="0" GridPane.columnIndex="1"
onAction="#updateXStart"/>
        <Label text="X End:" GridPane.rowIndex="0"
GridPane.columnIndex="2"/>
        <TextField fx:id="inputXEnd"
GridPane.rowIndex="0" GridPane.columnIndex="3"
onAction="#updateXEnd"/>

        <Label text="a1:" GridPane.rowIndex="1"
GridPane.columnIndex="0"/>
        <TextField fx:id="inputA1"
GridPane.rowIndex="1" GridPane.columnIndex="1"
onAction="#updateA1"/>
        <Slider fx:id="sliderA1" min="-25" max="25"
value="0" GridPane.rowIndex="1" GridPane.columnIndex="2"
onMouseReleased="#updateA1Slider"/>

        <Label text="a2:" GridPane.rowIndex="2"
GridPane.columnIndex="0"/>
        <TextField fx:id="inputA2"
GridPane.rowIndex="2" GridPane.columnIndex="1"
onAction="#updateA2"/>
        <Slider fx:id="sliderA2" min="-25" max="25"
value="0" GridPane.rowIndex="2" GridPane.columnIndex="2"
onMouseReleased="#updateA2Slider"/>

```

```

        <Label text="a3:" GridPane.rowIndex="3"
GridPane.columnIndex="0"/>
        <TextField fx:id="inputA3"
GridPane.rowIndex="3" GridPane.columnIndex="1"
onAction="#updateA3"/>
        <Slider fx:id="sliderA3" min="-25" max="25"
value="0" GridPane.rowIndex="3" GridPane.columnIndex="2"
onMouseReleased="#updateA3Slider"/>

        <Label text="a4:" GridPane.rowIndex="4"
GridPane.columnIndex="0"/>
        <TextField fx:id="inputA4"
GridPane.rowIndex="4" GridPane.columnIndex="1"
onAction="#updateA4"/>
        <Slider fx:id="sliderA4" min="-25" max="25"
value="0" GridPane.rowIndex="4" GridPane.columnIndex="2"
onMouseReleased="#updateA4Slider"/>

        <Label text="b1:" GridPane.rowIndex="5"
GridPane.columnIndex="0"/>
        <TextField fx:id="inputB1"
GridPane.rowIndex="5" GridPane.columnIndex="1"
onAction="#updateB1"/>
        <Slider fx:id="sliderB1" min="-25" max="25"
value="0" GridPane.rowIndex="5" GridPane.columnIndex="2"
onMouseReleased="#updateB1Slider"/>

        <Label text="b2:" GridPane.rowIndex="6"
GridPane.columnIndex="0"/>

```

```

        <TextField fx:id="inputB2"
GridPane.rowIndex="6" GridPane.columnIndex="1"
onAction="#updateB2"/>

        <Slider fx:id="sliderB2" min="-25" max="25"
value="0" GridPane.rowIndex="6" GridPane.columnIndex="2"
onMouseReleased="#updateB2Slider"/>

        <Label text="b3:" GridPane.rowIndex="7"
GridPane.columnIndex="0"/>

        <TextField fx:id="inputB3"
GridPane.rowIndex="7" GridPane.columnIndex="1"
onAction="#updateB3"/>

        <Slider fx:id="sliderB3" min="-25" max="25"
value="0" GridPane.rowIndex="7" GridPane.columnIndex="2"
onMouseReleased="#updateB3Slider"/>

        <Label text="b4:" GridPane.rowIndex="8"
GridPane.columnIndex="0"/>

        <TextField fx:id="inputB4"
GridPane.rowIndex="8" GridPane.columnIndex="1"
onAction="#updateB4"/>

        <Slider fx:id="sliderB4" min="-25" max="25"
value="0" GridPane.rowIndex="8" GridPane.columnIndex="2"
onMouseReleased="#updateB4Slider"/>

        <Label text="K1:" GridPane.rowIndex="9"
GridPane.columnIndex="0"/>

        <TextField fx:id="inputK1"
GridPane.rowIndex="9" GridPane.columnIndex="1"

```

```

onAction="#updateK1"/>
        <Slider fx:id="sliderK1" min="-25" max="25"
value="0" GridPane.rowIndex="9" GridPane.columnIndex="2"
onMouseReleased="#updateK1Slider"/>

        <Label text="K2:" GridPane.rowIndex="10"
GridPane.columnIndex="0"/>
        <TextField fx:id="inputK2"
GridPane.rowIndex="10" GridPane.columnIndex="1"
onAction="#updateK2"/>
        <Slider fx:id="sliderK2" min="-25" max="25"
value="0" GridPane.rowIndex="10" GridPane.columnIndex="2"
onMouseReleased="#updateK2Slider"/>

        <Label text="K3:" GridPane.rowIndex="11"
GridPane.columnIndex="0"/>
        <TextField fx:id="inputK3"
GridPane.rowIndex="11" GridPane.columnIndex="1"
onAction="#updateK3"/>
        <Slider fx:id="sliderK3" min="-25" max="25"
value="0" GridPane.rowIndex="11" GridPane.columnIndex="2"
onMouseReleased="#updateK3Slider"/>

        <Label text="K4:" GridPane.rowIndex="12"
GridPane.columnIndex="0"/>
        <TextField fx:id="inputK4"
GridPane.rowIndex="12" GridPane.columnIndex="1"
onAction="#updateK4"/>
        <Slider fx:id="sliderK4" min="-25" max="25"

```

```
value="0" GridPane.rowIndex="12" GridPane.columnIndex="2"
onMouseReleased="#updateK4Slider"/>
```

```
        <Button text="Запустити моделювання"
onAction="#handleSimulation" GridPane.rowIndex="13"
GridPane.columnIndex="1" GridPane.columnSpan="2"/>
```

```
    </GridPane>
```

```
    </VBox>
```

```
</GridPane>
```

Style.css

```
.chart-series-line {
    -fx-stroke: #31ff22; }
```

```
.chart-line-symbol {
    -fx-background-color: null, null; }
```