

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ФЕСЕНКО ВОЛОДИМИР ІВАНОВИЧ

УДК 537.874.6

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ У БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ШТУЧНИХ  
КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛАХ

01.04.03 – радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Радіоастрономічному інституті Національної академії наук України.

**Науковий консультант**

чл.-кор. НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор  
**Ваврів Дмитро Михайлович**,  
Радіоастрономічний інститут НАН України (м. Харків),  
заступник директора Радіоастрономічного  
інститута НАН України з наукової роботи.

**Офіційні опоненти:**

чл.-кор. НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор  
**Тарапов Сергій Іванович**,  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України  
(м. Харків), завідувач відділу радіоспектроскопії;

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Любчанський Ігор Леонідович**,  
Донецький фізико-технічний інститут ім. О. О. Галкіна НАН  
України (м. Київ), провідний науковий співробітник відділу теорії  
динамічних властивостей складних систем;

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Маслов Вячеслав Олександрович**,  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
(м. Харків), завідувач кафедри квантової радіофізики.

Захист відбудеться «29» квітня 2021 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету  
імені В. Н. Каразіна за адресою:

61022, Україна, м. Харків, майдан Свободи, 4, ауд. 3-9.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці  
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою:  
61022, Україна, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий «30» березня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Юрій АРКУША

**Актуальність теми.** Штучні композитні матеріали, до яких, зокрема, відносяться фотонні кристали (ФК) та метаматеріали (ММ), розглядаються останнім часом, як найбільш перспективні середовища для забезпечення ефективного управління просторовими та часовими характеристиками електромагнітного поля. Багатoelementні композитні матеріали, які створюються з використанням металевих, напівпровідникових, діелектричних, графенових і оптично-активних елементів, забезпечують широкі можливості для реалізації штучних ізотропних, анізотропних, магнітоактивних і гіротропних середовищ з керованими властивостями. Асортимент пристроїв, які створені або розробляються з використанням штучних композитних матеріалів надзвичайно широкий і включає практично всі прилади й елементи сучасної електроніки і оптики: фільтри, антени, хвилеводи, генератори, підсилювачі, ключі, дисплеї та інше.

Таким чином, синтез, теоретичне й експериментальне дослідження електродинамічних властивостей штучних багатокомпонентних композитних матеріалів, які можуть функціонувати на однакових фізичних принципах у різних діапазонах частот від мікрохвильового до оптичного, є надзвичайно актуальним напрямом сучасної радіофізики. Становлення та подальший розвиток цього напрямку потребує формування цілісної фізичної картини явищ, які притаманні новому класу композитних структур і розвитку відповідних математичних моделей для їх опису, технологій виготовлення, процедур експериментального дослідження та практичного впровадження. Зокрема, коректне математичне моделювання є вкрай необхідним для пошуку оптимальних конфігурацій таких структур з точки зору створення систем нового покоління. Однією із ключових вимог до новітніх радіофізичних та оптичних систем є забезпечення можливості їх контролю та гнучкого переналаштування на різні режими роботи. Важливим також є можливість їх легкої інтеграції до існуючих систем і сумісність зі стандартними технологіями виготовлення.

Незалежно від типу та способу реалізації штучних композитних матеріалів, розв'язок електродинамічної задачі про поширення в них електромагнітних хвиль зводиться до вивчення дисперсійних характеристик. Дисперсійна характеристика є ключовим параметром, що визначає характеристики та особливості використання таких матеріалів. Дисперсія пов'язує властивості електромагнітних хвиль і середовища, яка асоціюється із залежністю фазової швидкості хвилі в середовищі від частоти. Виникнення дисперсії зумовлено впливом геометричних (структурна дисперсія) або матеріальних (матеріальна дисперсія) параметрів середовища на характеристики поширення електромагнітної хвилі. Для деяких застосувань, таких, наприклад, як лінії затримки, бажано мати значну дисперсію в системі. У той же час, для більшості інших застосувань, наявність дисперсії представляє значну проблему, наприклад, хроматична дисперсія обмежує ширину смуги пропускання та призводить до значного спотворення форми імпульсів у волоконно-оптичних системах зв'язку. Таким чином, задача контролю та управління дисперсією має також суттєве прикладне значення.

При розробці хвилеводної системи можна отримати бажане значення як матеріальної, так і структурної дисперсії із застосуванням вже існуючих підходів, однак, їх використання має свої обмеження та недоліки. Так, наприклад, дисперсійні

залежності природних матеріалів визначаються їх молекулярною або атомною структурою і через це їх важко переналаштовувати в широкому спектральному діапазоні. Крім того, існуючі методи контролю структурної дисперсії, зокрема у волоконних та інтегральних оптичних хвилеводах, часто реалізуються в масштабі, що значно перевищує довжину хвилі, і це стає суттєвою завадою для їх високорівневої інтеграції в сучасних системах.

Фотонні кристали та метаматеріали на основі багатоелементних композитних середовищ забезпечують безпрецедентні можливості для гнучкого контролю характеристик (і зокрема, дисперсійних) поширення електромагнітних хвиль. ФК є, як правило, періодичними штучними середовищами, діелектрична проникність яких модулюється з періодом порівняним з довжиною електромагнітної хвилі. У свою чергу, ММ є періодичними (або неперіодичними) композитними середовищами, сформованими з використанням субхвильових компонентів (зазвичай резонансних). Дисперсійні характеристики таких штучних середовищ зумовлюються не стільки матеріальними та геометричними параметрами їх структурних елементів (наприклад, шарів, стрижнів, кілець та ін.), але, в більшій мірі, від того, яким чином ці елементи скомпоновано в єдину структуру.

У ФК керування дисперсійними характеристиками електромагнітних хвиль досягається на більш високому рівні складності в порівнянні зі звичайними матеріальними середовищами. Це є можливим завдяки існуванню фотонної забороненої зони (ФЗЗ), спектрального діапазону в межах якого поширення електромагнітних хвиль через ФК не відбувається, та регіонів аномального зростання щільності фотонних станів. Із фізичної точки зору, такі спектральні особливості ФК зумовлені деструктивною інтерференцією хвиль на структурних межах розділу середовищ. ФК знаходять застосування в багатьох пристроях оптичного та НВЧ діапазонів, зокрема вони використовуються для створення суперпризм і компресії коротких частотно-модульованих імпульсів за рахунок значної дисперсії на межі ФЗЗ.

На відміну від ФК, унікальні електродинамічні властивості метаматеріалів визначаються резонансними характеристиками субхвильових включень та їх складною електродинамічною взаємодією, що забезпечує можливість ще більш гнучкого керування дисперсійними та спектральними характеристиками ММ на субхвильовому рівні.

Найбільш цікавим з точки зору практичних застосувань є особливий тип ММ, що вирізняється гіперболічною дисперсією, завдяки можливості поширення в них електромагнітних хвиль з великими значеннями хвильового вектора (так звані, *high-k* хвилі). Така особливість призводить до виникнення низки особливих ефектів, серед яких можливо, зокрема, відзначити значне посилення спонтанної емісії, високу щільність фотонних станів, можливість керування напрямком поширення хвилі, фотонний ефект Холла, аномальне розсіяння та субхвильове фокусування.

Гнучкість у дизайні ММ та їх специфічні властивості, які не існують у природних матеріалах, призвели до появи нового покоління високоефективних фотонних компонентів і пристроїв. У той же час, незважаючи на значний прогрес, досягнутий в дослідженні електродинамічних характеристик ФК і ММ, залишається низка проблем, які потребують свого вирішення. Зокрема, з урахуванням складної

структури, більшість запропонованих на сьогодні оптичних метаматеріалів неможливо реалізувати на практиці в межах існуючих технологічних можливостей. Це призводить до необхідності при розробці метаматеріалів орієнтуватись на композитні середовища з відносно простою структурою, які можуть бути доволі легко реалізовані, що забезпечує ефективну трансформацію теоретичних досліджень у практичну площину. Іншою серйозною проблемою, яка притаманна ММ зі зростанням їх робочої частоти, є високий рівень внесених втрат, які часто на порядок вищі ніж допускається для практичних застосувань, що зокрема зумовлено використанням резонансних металічних елементів у їх конструкції. Це, в свою чергу, потребує адекватного врахування впливу омичних втрат на оптичний відгук ММ. Використання повністю діелектричних структур, які повністю вільні від омичних втрат, є можливою альтернативою для підвищення ефективності ММ, завдяки чому в останні роки повністю діелектричні ММ стали провідною темою наукових досліджень. Однак, у повністю діелектричних ММ також існує певне обмеження, що пов'язано з концентрацією поля всередині діелектричних компонент ММ, тоді як для низки практичних застосувань є важливою концентрація поля зовні структури поблизу її поверхні. Одним із можливих шляхів до рішення цієї проблеми є вибір відповідних дисперсійних властивостей ММ та створення штучної анізотропії завдяки використанню оптично-активних компонент.

В основі функціонування штучних композитних структур, які призначені для роботи в різних частотних діапазонах, можуть лежати різні фізичні принципи. Крім того, вони мають значні відмінності в своїй конструкції та виготовляються з використанням різних матеріалів. Незважаючи на це, їх дисперсійні характеристики подібні між собою та демонструють деякі специфічні властивості, а саме, наявність областей з аномальною та згладженою дисперсією, ефекти кросингу й анти-кросингу та деякі інші, які є надзвичайно корисними для вирішення задач керування та управління властивостями композитних структур. Результатом нестандартної поведінки дисперсійних кривих є поява низки нетривіальних ефектів, що мають неабияке практичне значення, зокрема: поява зворотних хвиль, зворотний ефект Доплера, значне уповільнення швидкості світла, зворотне випромінювання Черенкова, нетипові особливості в щільності фотонних станів та багато інших.

Знання дисперсійних характеристик штучних середовищ, створених на базі існуючих і перспективних багатоелементних композитних матеріалів, є наріжним каменем для методології керування дисперсією та дозволяє вирішити проблему створення пасивних та активних компонентів із визначеними робочими характеристиками. Таким чином, дослідження поширення електромагнітних хвиль у багатокомпонентних штучних композитних матеріалах у рамках єдиного уніфікованого підходу є актуальною задачею, яка має важливе наукове та практичне значення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконувалась у рамках досліджень відділу електронних НВЧ приладів Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України та кафедри фізичних основ електронної техніки Харківського національного університету радіоелектроніки у відповідності до держбюджетних НДР: «Фізичні основи поширення потужних квазі-параболічних УКІ в оптичних волокнах для систем

дистанційного застосування УКІ» (номер держ. реєстрації 0111U002955), «Розробка мікроструктурованих оптичних хвилеводів для реалізації функцій перетворення ультракоротких лазерних імпульсів у часовій та спектральній областях», (шифр «Імпульс», номер держ. реєстрації 0118U003072).

**Мета роботи.** *Метою роботи* є створення уніфікованої теорії поширення електромагнітних хвиль у багатокомпонентних штучних композитних матеріалах, дослідження закономірностей поширення хвиль з урахуванням анізотропії та просторової неоднорідності таких матеріалів і розробка методів ефективного управління просторовими та часовими характеристиками електромагнітного поля.

Для досягнення поставленої мети, в дисертації розв'язано наступні *задачі*:

1. З використанням методів скаляризації електромагнітного поля та матриць передачі, отримано аналітичні вирази для розрахунку дисперсійних і спектральних (коефіцієнти проходження, відбиття та поглинання) залежностей електромагнітних хвиль, що поширюються в періодичних та аперіодичних шаруватих середовищах, а також у планарних брегівських структурах, створених на їх основі.

2. У довгохвильовому наближенні з використанням положень теорії ефективного середовища отримано дисперсійні залежності ефективних матеріальних параметрів для надрешітки ферит-напівпровідник, яка знаходиться під дією зовнішнього статичного магнітного поля.

3. Із залученням теорії ефективного середовища отримано дисперсійні залежності для об'ємних і поверхневих електромагнітних хвиль, що поширюються в композитних магнітно-напівпровідникових надрешітках, які знаходяться під дією зовнішнього статичного магнітного поля. Виявлені ефекти кросингу та анти-кросингу дисперсійних кривих поверхневих та об'ємних поляритонів досліджено з використанням теорії критичних точок Морса.

4. Отримано та проаналізовано дисперсійні співвідношення для електромагнітних хвиль з правою та лівою круговими поляризаціями, що поширюються в дрібно-шаруватій структурі ферит-напівпровідник, шари якої намагнічено до насичення. Розв'язано задачу розсіяння плоских монохроматичних хвиль і тримірних гаусових хвильових пучків на такому середовищі та проаналізовано особливості їх поширення в умовах «гіротропної недійсності».

5. Розв'язано задачу по визначенню дисперсійних характеристик електромагнітних хвиль у круглому металевому хвилеводі, який повністю заповнений поздовжньо намагніченим гіроелектромагнітним середовищем. Вивчено вплив комбінованої хвилеводної та матеріальної дисперсії на характеристики гібридних хвилеводних режимів.

6. У загальному вигляді для довільного напрямку прикладеного зовнішнього статичного магнітного поля по відношенню, як до межі розділу середовищ (розглядається надрешітка ферит-напівпровідник), так і до напрямку поширення електромагнітної хвилі, отримано дисперсійне співвідношення для об'ємних хвиль, що поширюються у такому необмеженому двовісному бігіротропному середовищі та досліджено існування топологічних переходів ізочастотних поверхонь для звичайних і незвичайних об'ємних хвиль.

7. Розв'язано задачу по визначенню дисперсійних характеристик комплексних електромагнітних хвиль у напівпровідникових нанонитках з однорідним

графеновим покриттям (моношар графену). З використанням теорії комплексних хвиль проведено повну класифікацію отриманих хвилеводних режимів.

8. З використанням положень теорії Мі та формалізму теорії розсіяння хвиль на системах паралельних циліндрів, отримано розв'язок задачі розсіяння електромагнітних хвиль на напівпровідникових нанонитках з однорідним графеновим покриттям і на їх кластерах (димерах і тримерах). З використанням положень теорії гібридизації плазмонів, досліджено вплив точкової групи симетрії тримеру, створеного на базі напівпровідникових нанониток покритих моно-шаром графену, на плазмонні стани в ньому та на результуючий спектр розсіяння.

*Об'єкт дослідження* – фізичний процес взаємодії електромагнітного поля зі штучними багатокомпонентними композитними структурами.

*Предмет дослідження* – закономірності поширення та розсіяння електромагнітних хвиль на штучних композиційних середовищах і керування дисперсійними характеристиками електромагнітних хвиль при їх поширенні в таких середовищах.

*Методи дослідження.* У дисертації для розв'язання поставлених задач були використані аналітичні та числові методи дослідження. Основними із використаних методів є такі:

1. Метод скаляризації електромагнітного поля.
2. Метод матриць передачі та метод диференційних матриць Берремана.
3. Математичні методи лінійних диференційних рівнянь і теорії матричних функцій.
4. Теорія ефективного середовища.
5. Аналітична теорія критичних точок Морса.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У результаті виконання дисертаційної роботи було виявлено низку нових фізичних ефектів і закономірностей поширення та розсіяння електромагнітних хвиль на штучних композитних структурах, які характеризуються просторовою неоднорідністю та оптичною активністю (гіротропні й анізотропні та зокрема екстремально анізотропні середовища). Отримані в дисертації результати вказують на можливість ефективного керування хвилеводною дисперсією в таких штучних композитних середовищах, зокрема з використанням зовнішнього статичного магнітного поля.

Використання відомих методів аналізу та методів розвинутих під час виконання дисертації в поєднанні з підходами сучасної радіофізики та математичної фізики дозволило розв'язати окреслені вище задачі й отримати наступні нові результати:

1. З використанням методів матриць передачі та скаляризації електромагнітного поля розроблено фізико-математичні моделі періодичних та аперіодичних планарних брегівських структур. Створено ефективні числові алгоритми для дослідження дисперсійних та спектральних характеристик електромагнітних хвиль у таких композитних середовищах.

1.1. *Вперше*, для генерації аперіодичних шаруватих середовищ та планарних брегівських хвилеводів на їх базі, запропоновано використовувати самогенеруючі класичну й узагальнену послідовності Колакоскі, що дозволило отримати більш ефективні всіспрямовані відбивачі випромінювання.

1.2. Виявлено, що в брегівських хвилеводах з аперіодичним порядком чверть-хвильових шарів у оболонці, частоти відсічки спрямованих мод зсунуто в область більш високих частот (синій зсув), у порівнянні з хвилеводом з періодичною оболонкою. Досліджено вплив аперіодичної конфігурації оболонки на хроматичну дисперсію та *вперше* виявлено, що довжина хвилі нульової дисперсії зазнає червоного зсуву, в порівнянні зі стандартним брегівським хвилеводом. Отримані результати вказують на можливість проведення більш гнучкої селекції спрямованих мод, що в свою чергу відкриває більш широкі можливості для керування поляризаційно-залежними ефектами.

2. Створено загальну теорію та отримано оригінальний розв'язок задачі, щодо визначення дисперсійних характеристик об'ємних і поверхневих поляритонів, які поширюються в композитному середовищі, сформованому у вигляді надрешітки ферит-напівпровідник, що знаходиться під впливом зовнішнього статичного магнітного поля. Розв'язок задачі отримано в загальному вигляді для довільного напрямку прикладеного зовнішнього статичного магнітного поля по відношенню як до межі розділу середовищ, так і до напрямку поширення електромагнітної хвилі.

2.1. Розроблено низку ефективних математичних алгоритмів і детально проаналізовано дисперсійні характеристики хвиль для трьох базових конфігурацій намагніченості шаруватого середовища: полярної, Фарадея та Фойгта. *Вперше* виявлено, що в двох окремих конфігураціях намагніченості, а саме в полярній геометрії та геометрії Фойгта, регіони існування поверхневих та об'ємних поляритонів можуть частково, або повністю, перекриватись. Дано фізичне обґрунтування виявленого ефекту. Показано, що таке співіснування об'ємних і поверхневих поляритонів у межах одного і того ж самого діапазону частот та хвильових векторів при фіксованому значенні прикладеного зовнішнього статичного магнітного поля може бути отримано шляхом відповідного вибору матеріальних і геометричних параметрів надрешітки.

2.2. Виявлено ефекти кросингу й антикросингу, які спостерігаються для дисперсійних кривих як поверхневих, так і об'ємних поляритонів, що поширюються в бігіротропному середовищі. Отримані ефекти ідентифіковано та досліджено з використанням аналітичної теорії критичних точок Морса.

2.3. Для необмеженого двовісного бігіротропного середовища без матеріальних втрат, *вперше* виявлено існування *бігіперболічної* форми ізочастотної поверхні незвичайних об'ємних хвиль. Така *бігіперболічна* ізочастотна поверхня є *новим класом топології хвильової дисперсії*.

2.4. *Вперше* продемонстровано, що поблизу частоти феромагнітного резонансу, ізочастотна поверхня незвичайних об'ємних хвиль має форму конусу, розрізаного на дві або чотири частини (тобто, *тетра-гіперболічно-подібна* ізочастотна поверхня), які орієнтовані вздовж напрямку прикладеного до надрешітки зовнішнього статичного магнітного поля.

2.5. Виявлено, що матеріальні втрати в базових напівпровідниковому та магнітному шарах композиційного середовища мають значний вплив на дисперсійні залежності незвичайних хвиль. Зокрема, для таких хвиль мають місце топологічні переходи, індуковані втратами. *Вперше* продемонстровано, що індуковані втратами топологічні переходи відбуваються в межах частотного



діапазону, де реальна частина щонайменше однієї діагональної компоненти тензорів магнітної чи діелектричної проникностей наближається до нуля, в той час як її уявна частина є значною.

3. Створено та досліджено фізико-математичні моделі які описують поширення та розсіяння електромагнітних хвиль на дрібно-шаруватій структурі ферит-напівпровідник (шари якої намагнічені до насичення), яку розташовано в вільному просторі або в круглому металевому хвилеводі. Розроблено ефективні числові алгоритми для дослідження дисперсійних характеристик електромагнітних хвиль у таких електродинамічних структурах.

3.1. Вивчено особливості розсіяння плоских монохроматичних хвиль і тримірних гаусових хвильових пучків на бігіротропному середовищі в околиці частоти «гіротропної недійсності». *Вперше* продемонстровано, що тривимірний хвильовий гаусів пучок може проходити крізь таке середовище зберігаючи свої параметри незмінними навіть при похилому падінні, за винятком частини енергії поглиненої в матеріалі середовища.

3.2. Детально вивчено вплив комбінованої хвилеводної та матеріальної дисперсії на характеристики гібридних режимів круглого металевого хвилеводу, який повністю заповнений поздовжньо намагніченим гіроелектромагнітним середовищем. Виявлено, що дисперсійні залежності власних хвиль у такій хвилеводній системі різко відрізняються від дисперсійних характеристик мод у звичайних діелектричних, феритових і плазмових хвилеводах. Зокрема продемонстровано, що одночасна наявність гіромагнітних і гіроелектричних ефектів у хвилеводній системі, забезпечує можливість суттєвого керування дисперсійними характеристиками гібридних мод хвилеводу.

4. Узагальнено існуючу теорію та створено фізико-математичні моделі для вивчення дисперсійних характеристик комплексних електромагнітних хвиль у напівпровідникових нанонитках з однорідним графеновим покриттям (моношар графену). Виявлено особливості розсіяння електромагнітних хвиль на таких електродинамічних структурах та їх кластерах.

4.1. З використанням положень теорії комплексних хвиль, вивчено дисперсійні особливості всього спектру хвилеводних мод, що можуть існувати в нанонитці з однорідним графеновим покриттям і проведено їх детальну класифікацію. Виявлено два регіони існування поверхневих плазмонів ТМ-поляризації, де вони з'являються як спрямовані та реактивні хвилі. *Вперше* коректно визначено умови відсічки для поверхневих плазмонів ТМ поляризації вищого порядку.

4.2. З використанням положень теорії Мі та формалізму розсіяння хвиль на системах паралельних циліндрів досліджено електромагнітний відгук, як одиночних нанониток з однорідним графеновим покриттям, так і кластерів таких нанониток, при падінні на них лінійно поляризованих плоских хвиль, у терагерцовому діапазоні частот. *Вперше* виявлено, що пониження точкової симетрії кластеру призводить до появи додаткових областей невидимості в спектрі розсіяння, такий ефект обумовлено гібридизацією плазмонних станів у кластері нанониток, при порушенні його симетрії.

**Практичне значення отриманих результатів.** Завдяки своїм унікальним електрооптичним, магнітооптичним, поляризаційним, резонансним і динамічним характеристикам шаруваті середовища сформовані з використанням оптично-активних матеріалів (наприклад, напівпровідників, магнетиків, композитних матеріалів, графену та ін.) дозволяють ефективно управляти дисперсійними характеристиками електромагнітних хвиль, внаслідок чого знаходять все більш широке застосування в різноманітних областях, зокрема в радіофізиці, оптоелектроніці, плазмоніці та фотоніці. Зокрема, вони використовуються при створенні частотних і поляризаційних фільтрів, модуляторів, дефлекторів, планарних хвилеводних структур, елементів ліній затримок та компенсаторів дисперсії. У той же час, напівпровідникові нанонитки з оптично-активним покриттям демонструють не менш унікальні електродинамічні характеристики. Можливість їх інтеграції в електронні пристрої, нові субхвильові оптичні ефекти, здатність ефективно взаємодіяти з іншими нано- та мікроскопічними об'єктами, велика толерантність до механічних деформацій, розв'язка масштабів довжин, що обумовлена різними фізичними явищами в радіальному та осьовому напрямках, призвели до їх широкого практичного застосування. Отримані розв'язки, сформульованих у дисертації задач, і досліджені штучні середовища мають прикладне значення та можуть бути використані при проектуванні наступних пристроїв оптоелектроніки та плазмоніки: інтегрально-оптичних пристроїв на базі брегівських шаруватих середовищ з аперіодичним розташування шарів, що забезпечують бажані дисперсійні, спектральні та поляризаційні характеристики, зокрема, компенсаторів дисперсії та ширококутових всеспрямованих відбивачів; пристроїв керування випромінюванням як НВЧ, так і оптичного діапазонів, таких як фільтри, ізолятори, перемикачі та ін. на базі дрібно-шаруватих середовищ ферит-напівпровідник, які знаходяться під дією зовнішнього статичного магнітного поля; оптичних покриттів із низьким коефіцієнтом відбиття та тонко-плівкових фільтрів на базі бігіротропних композитних середовищ, матеріальні параметри яких задовольняють умові «гіротропної недійсності»; пристроїв для субхвильової передачі зображень, які долають традиційний дифракційний бар'єр, маршрутизаторів оптичних сигналів, оптичних поглиначів і резонаторів із використанням унікальних характеристик гіперболічного метаматеріалу на базі бігіротропного екстремально анізотропного середовища в частотних регіонах де діагональні компоненти ефективних тензорів як магнітної так і діелектричної проникностей мають різні знаки; пристроїв фотоніки та плазмоніки, що можуть бути динамічно переналаштовані, на базі напівпровідникових нанониток покритих моношаром графену, завдяки можливості керування величиною провідності графену шляхом зміни величини його хімічного потенціалу або температури навколишнього середовища. Зокрема, вони можуть використовуватись у якості гібридних хвилеводів, насичених поглиначів у волоконних лазерах, надшвидких оптичних модуляторів, оптичних відгалужувачів та таке інше; оптичне маскування об'єктів з використанням кластерів нанониток покритих моношаром графену.

У результаті виконання дисертаційної роботи, було отримано патент України на винахід UA 109953 C2 [26].

**Особистий внесок дисертанта.** У дисертації використано наукові роботи [1 – 26] та матеріали тез доповідей на конференціях. З їх числа, 3 роботи опубліковано дисертантом без співавторства, а інші виконано в співавторстві з Москвітіною Ю. К., Сухоївановим І. О., Тузом В. Р., Ткачовою Т. І., Федоріним І. В., Шулікою О. В., Шульгою С. М., Шульгою В. М., Щербініним В. І., Якушевим С.О., Andrés M. V., Garcia P. P .R, Han W., Khrypunov G., Khrypunova A., Sun H.-B., Sayin H., Yu P. У всіх статтях, які опубліковано в співавторстві, особистий внесок пошукача полягає у виборі об’єктів дослідження та методів їх аналізу, вибору геометрії структур, що розглядаються та їх параметрів, розробці математичних алгоритмів і програмного забезпечення, обговоренні та аналізі отриманих результатів, а також визначенні наступних етапів роботи. У наукових роботах [2, 3, 5, 7, 9, 12, 14 – 17, 22, 24, 25] дисертантом обрані об’єкти дослідження; в [2, 3, 5, 7, 8, 12, 14 – 17] запропоновано метод розв’язку і в [3, 6, 8, 10, 13, 15, 16, 21] самостійно отримано розв’язок задач взаємодії електромагнітних хвиль зі структурами, що досліджуються; в статтях [4, 6, 8, 10, 11, 13, 20, 22, 23] дисертантом отримано числовий розв’язок задач.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи за темою дисертації представлялись та обговорювались на наукових семінарах кафедри фізичних основ електронної техніки та міжнародної лабораторії «Фотоніка» Харківського національного університету радіоелектроніки та відділу електронних НВЧ приладів Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, а також на наступних міжнародних конференціях і симпозіумах: The International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling “LFNM” (Yalta 2005, Alushta 2008; Sevastopol 2010); Young Scientist Conference on “Radiophysics and Electronics” “YSC” (Kharkiv 2007, 2011); The International Conference Mathematical Methods in Electromagnetic Theory “MMET” (Odesa 2008; Kharkiv 2012; Lviv 2016); The International Workshop on Nonlinear Photonics “NLP” (Kharkiv 2011); NATO Advanced Research Workshop on Detection of Explosives and CBRN (Using Terahertz) “TERA-MIR” (Izmir 2012); OSA Advances in Optical Materials “AOM” (San Diego 2012); The International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers “CAOL” (Sudak 2013, Odesa 2016); SPIE Optics + Optoelectronics (Prague 2013); The International Workshop: Séptima Reunión Universitaria de Fotónica y Óptica “RUFO” (Guanajuato 2014); SPIE Optics + Photonics (San Diego 2014); The International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communication “MIKON” (Gdansk 2014); The International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves “MSMW” (Kharkiv 2016); The International Conference on Antenna Theory and Techniques “ICATT” (Kyiv 2017); The European Microwave Conference. The European Microwave Week “EuMW” (Nuremberg 2017).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковано в 47 наукових працях: 2 статтях в фахових журналах України [1, 2], 19 публікаціях у зарубіжних виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus [3–21], 4 розділах у книгах зарубіжних видавництв [22–25], патенті України [26], і 21 збірнику докладів міжнародних конференцій.

**Структура дисертації.** Дисертація викладена на 339 сторінках, з них основний текст – 256 с.; додатки – 28 с.; 91 рисунок; список використаних

літературних джерел – 32 с. (який включає 358 найменувань українських і зарубіжних авторів, на які зроблено посилання в дисертації).

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** викладено актуальність теми й обґрунтовано необхідність виконання роботи, позначено мету й об'єкт дослідження, сформульовано задачі й описано методи, необхідні для їх розв'язання. Наведено зв'язок роботи з науковими програмами, показано наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів.

У **першому розділі** «Огляд наукової літератури» розглянуто сучасний стан фізики штучно створених складно-комполитних середовищ, зокрема фотонних кристалів і метаматеріалів. Наведено теоретичні й експериментальні дані про такі структури. Розглядаються питання, щодо механізмів керування дисперсією електромагнітних хвиль у фотонних кристалах і пристроях інтегральної оптики на їх базі, поведінка поверхневих та об'ємних хвиль, електродинаміка метаматеріалів, дисперсійні характеристики хвилеведучих структур ТГц діапазону. Значну увагу приділено визначенню впливу оптично-активних (анізотропних, магнітоактивних, гіротропних) середовищ у конструкції зазначених структур на їхні дисперсійні та спектральні характеристики.

У **другому розділі** «Дисперсія електромагнітних хвиль у періодичних та аперіодичних планарних брегівських структурах» досліджуються дисперсійні та спектральні характеристики планарних брегівських відбивачів та інтегрально-оптичних хвилеводів, створених на їх основі. Дослідження спрямовані на досягнення бажаної трансформації спектрального відгуку брегівського відбивача шляхом спеціального упорядкування установчих шарів у ньому, з метою отримання ефективного контролю над оптичними та дисперсійними характеристиками в створеному штучному середовищі.

Досліджується планарний брегівський хвилевод, що сформовано з хвилеводного шару з товщиною  $2d_g$  та показником заломлення  $n_g = \sqrt{\varepsilon_g \mu_g}$ . Шар розташований між двома скінченими одновимірними періодичними або аперіодичними брегівськими відбивачами, як це наведено на Рис. 1 (а). Шарувата оболонка сформована з набору діелектричних шарів  $Y$  та  $\Psi$  (Рис. 1 (б)), виготовлених із двох різних немагнітних матеріалів ( $\mu_Y = \mu_\Psi = 1$ ), що характеризуються фізичними товщинами  $d_Y$  та  $d_\Psi$  та показниками заломлення  $n_Y = \sqrt{\varepsilon_Y \mu_Y}$  та  $n_\Psi = \sqrt{\varepsilon_\Psi \mu_\Psi}$ , відповідно. Показники заломлення в загальному випадку є комплексними величинами. Кожен із брегівських відбивачів складається з  $N_\sigma$  шарів, причому кількість шарів кожного типу  $Y$  або  $\Psi$  позначено через  $N_Y$  та  $N_\Psi$ , відповідно. Товщина всієї структури є  $2L$ . Зовнішні напівпростори  $z \leq -L$  та  $z \geq L$  вважаються однорідними ізотропними середовищами без втраг.

Вважаємо, що на шаруватому середовищі падає плоска монохроматична хвиля з частотою  $\omega$  та ТЕ або ТМ-поляризацією, як це зображено на Рис. 1 (б). Напрямок поширення випромінювання в осерді хвилевода задається хвильовим вектором  $\vec{k}$  та однозначно визначається за допомогою кутів  $\varphi_0$  та  $\psi_0$ , які відраховуються від вісей  $z$  та  $x$ , відповідно. Такі плоскі хвилі формують відповідні ТЕ або ТМ моди планарного хвилеводу, які поширюються вздовж осердя хвилеводу завдяки чисельним перевідбиттям між шаруватими оболонками.

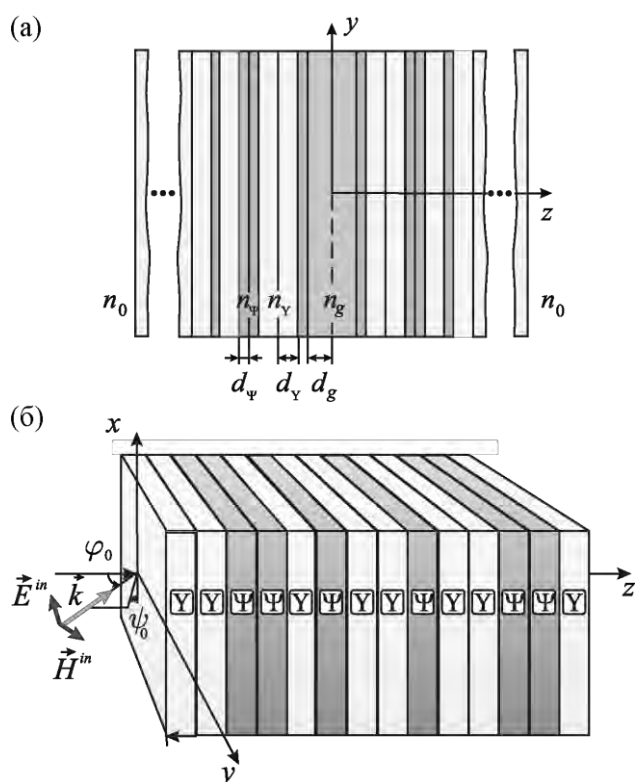


Рис. 1 (а) Схематичне зображення симетричного брегівського хвилеводу з аперіодичним розташуванням діелектричних шарів в оболонці; (б) до розрахунку коефіцієнта відбиття

шаруватих (періодичних та аперіодичних) оболонках хвилеводу та визначенню їх спектральних характеристик (Рис. 2). Розглянуто декілька конфігурацій шаруватих оболонок, а саме: періодична та три альтернативні аперіодичні, які сформовано з використанням правил заміщення: Фібоначчі, Тує-Морса та Колакоскі [16]. Слід зазначити, що використання самогенеруючих класичної ( $K(1,2)$  та  $K(2,1)$ ) та узагальненої ( $K(a,b)$ ,  $a, b \in \mathbb{Z}$ ) послідовностей Колакоскі для формування аперіодичних шаруватих середовищ було запропоновано автором вперше.

У ході досліджень було виявлено, що ширина спектрального діапазону всеспрямованого відбиття, отриманого для брегівських відбивачів на базі класичної послідовності Колакоскі, перевищує аналогічне значення для структури Тує-Морса при тих же геометричних і матеріальних параметрах базових шарів, що дозволяє створювати більш ефективні всеспрямовані відбивачі випромінювання на їх основі та робить їх більш перспективними кандидатами для практичних застосувань, у порівнянні з іншими аперіодичними середовищами.

Вперше продемонстровано, що кількість діапазонів всеспрямованого відбиття (заштриховані області на Рис. 2) в спектрах аперіодичних шаруватих середовищ сформованих на базі класичної та узагальненої послідовностей Колакоскі, залежить не тільки від контрасту показників заломлення їх установчих шарів  $r = n_\psi/n_\psi$  і порядку генерації вихідної послідовності  $\sigma$  (як це типово для інших типів

Дисперсійне рівняння для власних хвиль брегівського хвилеводу було отримано з використанням методу матриць передачі. Зазначене рівняння має вигляд :

$$1 - R^2 \exp \left[ 4ik_0 d_g (n_j^2 - n_{eff}^2)^{1/2} \right] = 0, \quad (1)$$

де  $n_{eff} = \beta/k_0$  – ефективний індекс моди;  $n_j$  приймає значення  $n_g, n_\psi$  та  $n_\psi$ ,  $R = (b_0/a_0)|_{b_{N\sigma}=0} = -t_{21}/t_{22}$  – коефіцієнт відбиття оболонки;  $t_{mn}$  – елементи загальної матриці передачі  $\mathbf{T}_\Sigma$  структури;  $a_0$  та  $b_0$  – амплітуди прямих та зворотніх хвиль у межах хвилеводного каналу, які задовольняють наступній системі лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} a_0 \exp[-ik_{zg} d_g] = R b_0 \exp[ik_{zg} d_g], \\ b_0 \exp[-ik_{zg} d_g] = R a_0 \exp[ik_{zg} d_g], \end{cases} \quad (2)$$

де  $k_{zg} = k_0(n_g^2 - n_{eff}^2)^{1/2}$ .

З рівняння (1) слідує, що дисперсійні характеристики планарного брегівського хвилеводу, в значній мірі зумовлені дисперсійною характеристикою  $R(\omega)$ . Зважаючи на це, перша частина розділу присвячена аналізу хвильових процесів у

аперіодичних шаруватих середовищ), але і в значній мірі, від вибору алфавіту  $A = \{a, b\}$  в генеруючій послідовності, як це наведено на Рис. 2. На цьому рисунку вкладки (а) та (б) відповідають аперіодичним послідовностям у яких сума символів  $a + b$  приймає або непарне (тобто:  $a + b = 2k + 1$ ,  $k \in \mathbb{Z}$ ), або парне  $a + b = 2k$  значення, відповідно. Основною відмінністю між ними, є наявність (у випадку коли  $a + b = 2k$ ) та відсутність у протилежному випадку ( $a + b = 2k + 1$ ) ФЗЗ в околицях центральної частоти  $\omega_0$ .

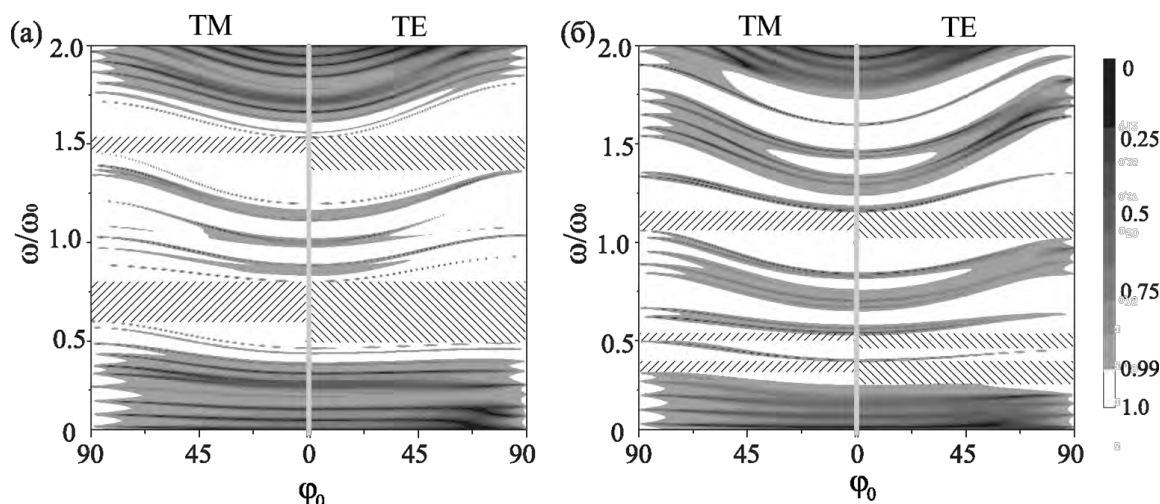


Рис. 2 Спектри відбиття шаруватих діелектричних структур, які сформовано на основі (а) класичної  $K(1, 2)$  та (б) узагальненої  $K(1, 3)$  послідовностей. Де,  $n_\psi = 1.47$ ,  $n_\gamma = 4.7$ ,  $r = n_\gamma/n_\psi = 3.2$ ,  $d_\psi = 204.1$  нм  $d_\gamma = 63.8$  нм

Подальша оригінальна частина розділу присвячена дослідженню дисперсійних характеристик брегівських хвильоводів із різним дизайном шаруватих оболонок. Отримані дисперсійні характеристики хвильоводних структур із періодичною та аперіодичною оболонками наведено на Рис. 3 та 4.

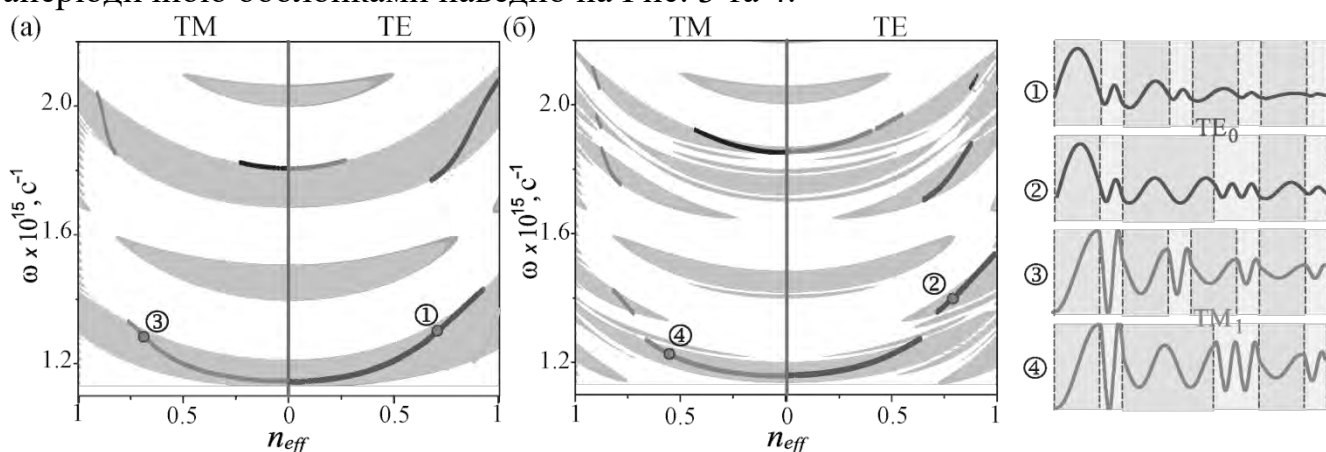


Рис. 3 Мапи ФЗЗ оболонки та дисперсійні залежності для  $TE_m$  та  $TM_m$  хвиль у брегівському хвильоводі з періодичною (а) та аперіодичною (б) оболонками. (в) Розподіли поперечних складових електричного  $E_x$  та магнітного  $H_x$  полів для  $TE_0$  та  $TM_1$  мод. Зафарбовані області на (а) та (б) відповідають значенню  $|R| \geq 0.9$

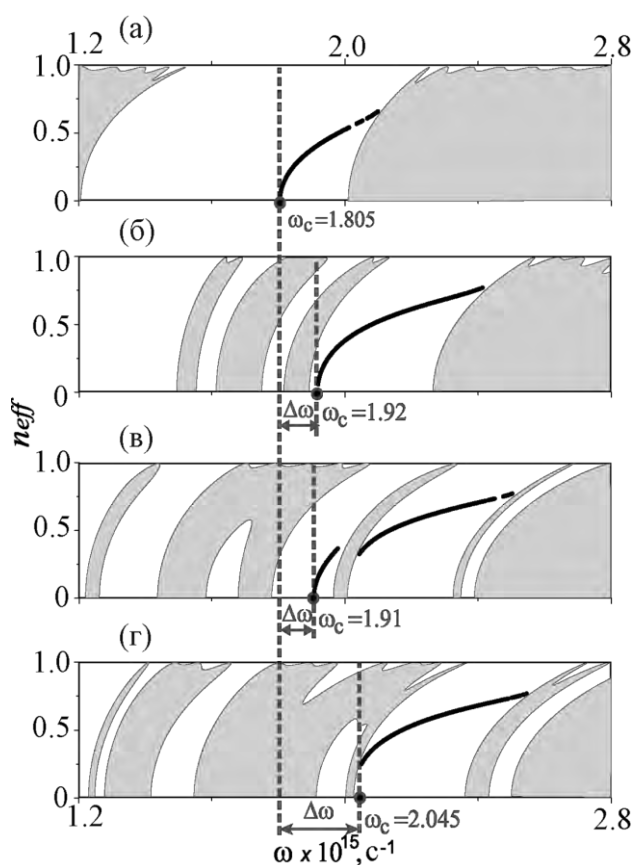


Рис. 4 Дисперсійні залежності  $TM_1$  моди в брегівських хвилеводах з різним впорядкуванням шарів у оболонці: (а) періодичним; (б) Фібоначчі; (в) Тує-Морса; (г) Колакоскі  $K(1,2)$ . Незафарбовані області відповідають  $|R| \geq 0.99$

аперіодичним порядком чверть-хвильових шарів у оболонці, як для  $TE_m$  так і для  $TM_m$  мод, яка полягає у зсуві частоти відсічки відповідних мод  $\omega_c$  в область більш високих частот (синій зсув) для аперіодичної конфігурації оболонки в порівнянні з періодичною структурою, як це наведено на Рис. 4, цей ефект отримано автором вперше. Важливо зазначити, що даний частотний зсув не спостерігається в структурах, в яких оболонку сформовано з шарів, товщини яких не задовольняють умові Брега, зокрема у хвилеводах в яких товщини шарів співвідносяться як  $1:2$ , див. Рис. 3.

У третьому розділі «Дисперсія об'ємних і поверхневих електромагнітних хвиль в композитних магнітно-напівпровідникових надрешітках» створено загальну теорію та отримано оригінальний розв'язок задачі, щодо визначення дисперсійних характеристик об'ємних і поверхневих поляритонів, які поширюються в композитному середовищі сформованому у вигляді надрешітки ферит-напівпровідник, що знаходиться під впливом зовнішнього статичного магнітного поля. Розв'язок задачі отримано в загальному вигляді для довільного напрямку

Результати Рис. 3 відповідають планарним хвилеводам із повітряним прошарком шириною  $2d_g = (2/3)(d_\Psi + d_\Upsilon)$ , який розташовано між двома ідентичними брегівськими відбивачами, товщини установчих шарів (GaAs та окислений AlAs) в яких співвідносяться між собою, як  $d_\Psi : d_\Upsilon = 1 : 2$ . У свою чергу для Рис. 4 обрано наступні товщини шарів:  $2d_g = \lambda_0/2$ ,  $d_\Psi = \lambda_0/4n_\Psi$ ,  $d_\Upsilon = \lambda_0/4n_\Upsilon$ ,  $\lambda_0 = 1.0$ .

Далі в розділі було продемонстровано (Рис. 3), що дисперсійні криві у хвилеводах з аперіодичною оболонкою є фрагментарними та мають більше частот відсічки в порівнянні з відповідними характеристиками планарних хвилеводів з періодичною оболонкою. Ця особливість дисперсійних характеристик хвилеводу з аперіодичною оболонкою дозволяє проводити більш гнучку селекцію хвилеводних мод, що у свою чергу відкриває більше можливостей в керуванні поляризаційно-залежними ефектами. Також, виявлено відмінність між дисперсійними кривими для хвилеводів із періодичним та

прикладеного зовнішнього статичного магнітного поля по відношенню, як до межі розділу середовищ, так і до напрямку поширення електромагнітної хвилі.

Об'єктом дослідження є напівнескінчена періодична композита структура, яка формує надрешітку в напрямку вісі  $y$  та займає напівпростір  $y < 0$ , як це зображено на Рис. 5. Кожен період структури містить два шари: магнітний (з матеріальними параметрами  $\epsilon_m$  та  $\hat{\mu}_m$ ) та напівпровідниковий ( $\hat{\epsilon}_s, \mu_s$ ), що характеризуються товщинами  $d_m$  та  $d_s$ , відповідно. Період структури позначено, як  $L = d_m + d_s$ . Верхній напівпростір  $y > 0$  заповнено однорідним ізотропним середовищем без втрат з параметрами  $\epsilon_0 = \mu_0 = 1$ . Межа розділу між надрешіткою та вільним простором лежить у площині  $x - z$ , і вздовж цього напрямку структура вважається нескінченною. Надгратка знаходиться під дією зовнішнього статичного магнітного поля, причому вектор  $\vec{M}$  лежить у площині  $y - z$  та створює кут  $\theta$  з віссю  $y$ . Індукція магнітного поля вважається достатньою для формування однорідної намагніченості, в обох, магнітному та

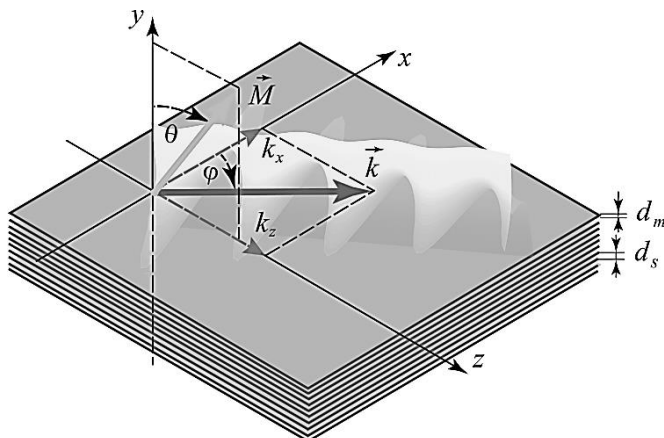


Рис. 5 Схематичне зображення магнітно-напівпровідникової надрешітки яка знаходиться під дією зовнішнього статичного магнітного поля  $\vec{M}$ , з візуальним відображенням тангенціальної компоненти електричного поля поверхневого поляритону який поширюється вздовж інтерфейсу розділу середовищ

напівпровідниковому шару. Хвильовий вектор  $\vec{k}$  макроскопічного електромагнітного поля лежить у площині  $x - z$  та створює кут  $\varphi$  з віссю  $x$ .

Зважаючи на те, що всі характерні розміри надрешітки задовольняють довгохвильовому наближенню ( $d_m \ll \lambda, d_s \ll \lambda, L \ll \lambda$ ), до розгляду була залучена процедура гомогенізації з теорії ефективного середовища, яка дозволила отримати усереднені вирази для ефективних параметрів надрешітки в явному вигляді. У результаті композитна дрібно-шарувата структура на базі матеріалів BaCO/Si, була зведена до однорідного бігіротропного середовища, яке характеризується тензорами ефективних проникностей  $\hat{\mu}_{eff}$  та  $\hat{\epsilon}_{eff}$ . У розділі детально розглянуто три окремі орієнтації вектора зовнішнього статичного магнітного поля по відношенню до хвильового вектору  $\vec{k}$  та інтерфейсу надрешітки (Рис. 6), а саме: а) *полярна геометрія*,  $\vec{M} \parallel y$  та  $\vec{M} \perp \vec{k}$ ; б) *геометрія Фойгта*,  $\vec{M} \parallel z$  та  $\vec{M} \perp \vec{k}$ ; в) *геометрія Фарадея*,  $\vec{M} \parallel z$  та  $\vec{M} \parallel \vec{k}$ .

У загальному випадку, в довільному гіротропному середовищі одночасно існують дві незалежні власні хвилі (звичайна та незвичайна об'ємні хвилі), у той час, як поверхневі хвилі є гібридними ЕН- та НЕ-модами. Вони поділяються на дві незалежні поперечну електричну ТЕ та поперечну магнітну ТМ поляризації тільки для деяких конкретних конфігурацій намагніченості (наприклад, для геометрії



Фойгта). Характеристичні рівняння для поверхневих та об'ємних поляритонів, для трьох зазначених випадків намагніченості (див., Рис. 6), були отримані шляхом розв'язку рівнянь Максвелла з застосуванням відповідних граничних і початкових умов. Отримані дисперсійні рівняння для поверхневих поляритонів мають по чотири корені  $k_i$  ( $i = 1,2,3,4$ ). Два з цих чотирьох коренів є фізичними (позначені в роботі, як  $\kappa_1$  та  $\kappa_2$ ) та відповідають хвилям, що затухають при поширенні. У випадку середовища без втрат, що розглядається на даному етапі, в залежності від положення на площині  $k_0 - k_i$  ( $i = x, z$ ), можуть виникати чотири різні комбінації між значеннями  $\kappa_1$  та  $\kappa_2$ , які відповідають поширенню хвиль різного типу. У подальшому викладенні розглядався випадок поширення дійсних поверхневих хвиль, для яких обидва корені  $\kappa_1$  та  $\kappa_2$  є дійсними та додатніми.

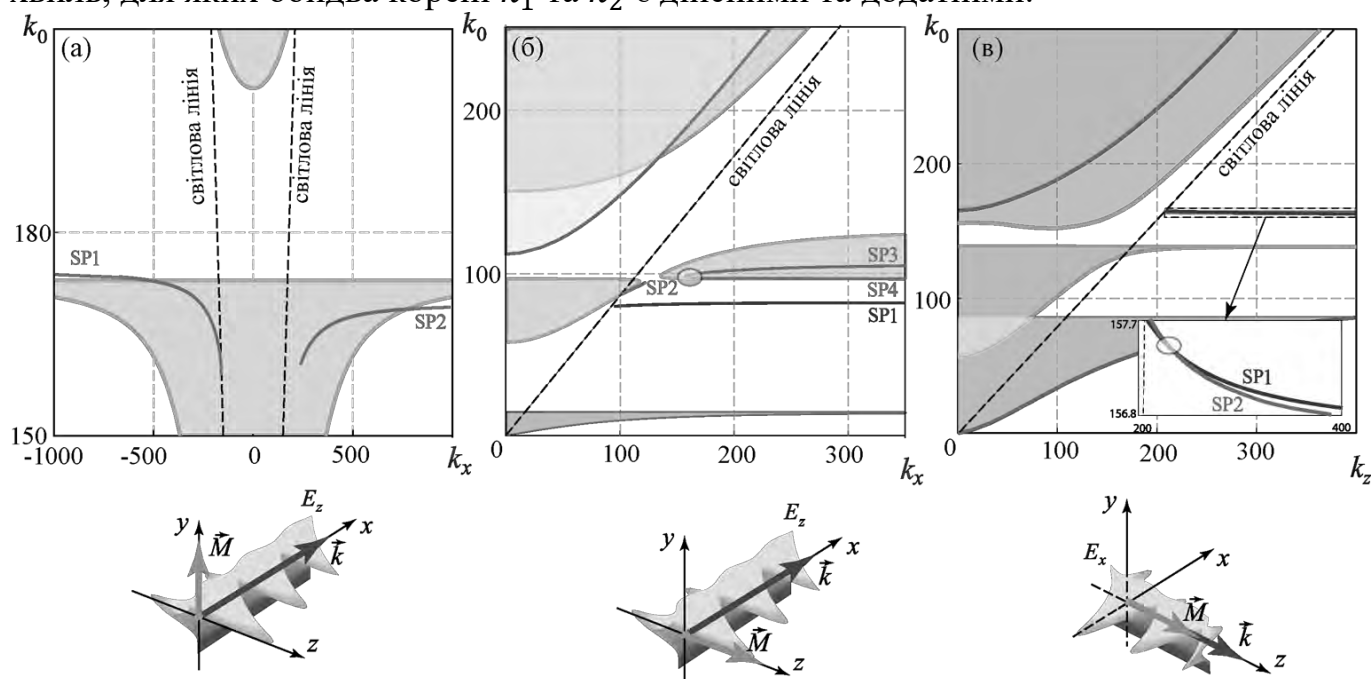


Рис. 6 Области існування об'ємних хвиль (зафарбовані регіони) та дисперсійні гілки поверхневих хвиль (позначено літерами «SP»): (а) геометрія Фойгта,  $\delta_m = d_m/L = 0.396$ ; (б) полярна геометрія,  $\delta_m = 0.081$ ; (в) геометрія Фарадея  $\delta_m = 0.15$ . У нижній частині рисунку наведено просторову орієнтацію вектору  $\vec{M}$  по відношенню до хвильового вектору  $\vec{k}$  та інтерфейсу надрешітки та відображено результуючу тангенціальну компоненту електричного поля  $E_i$  ( $i = x, z$ ) поверхневого поляритону, що поширюється вздовж межі розділу двох середовищ

Визначено області існування об'ємних і поверхневих поляритонів та отримано умови для їх меж поширення та асимптотичних частот. Подальша частина розділу стосується аналізу отриманих дисперсійних залежностей, які демонструють ряд унікальних характеристик, що можна бачити на Рис. 6 та 7. Зокрема, в ході виконання роботи, було вперше виявлено, що в двох окремих конфігураціях намагніченості, а саме в полярній геометрії та геометрії Фойгта, *регіони існування поверхневих та об'ємних поляритонів можуть частково або повністю перекриватись*, як це зображено на Рис. 6 (а) та 6 (б). Визначено умови для повного співпадання регіонів існування об'ємних і поверхневих хвиль. Таке співіснування об'ємних і поверхневих поляритонів у межах одного і того ж самого діапазону

частот і хвильових векторів при фіксованому значенні прикладеного зовнішнього статичного магнітного поля спостерігається у спеціальних конфігураціях надрешітки, які було отримано шляхом розв'язку задачі багато-параметричної оптимізації.

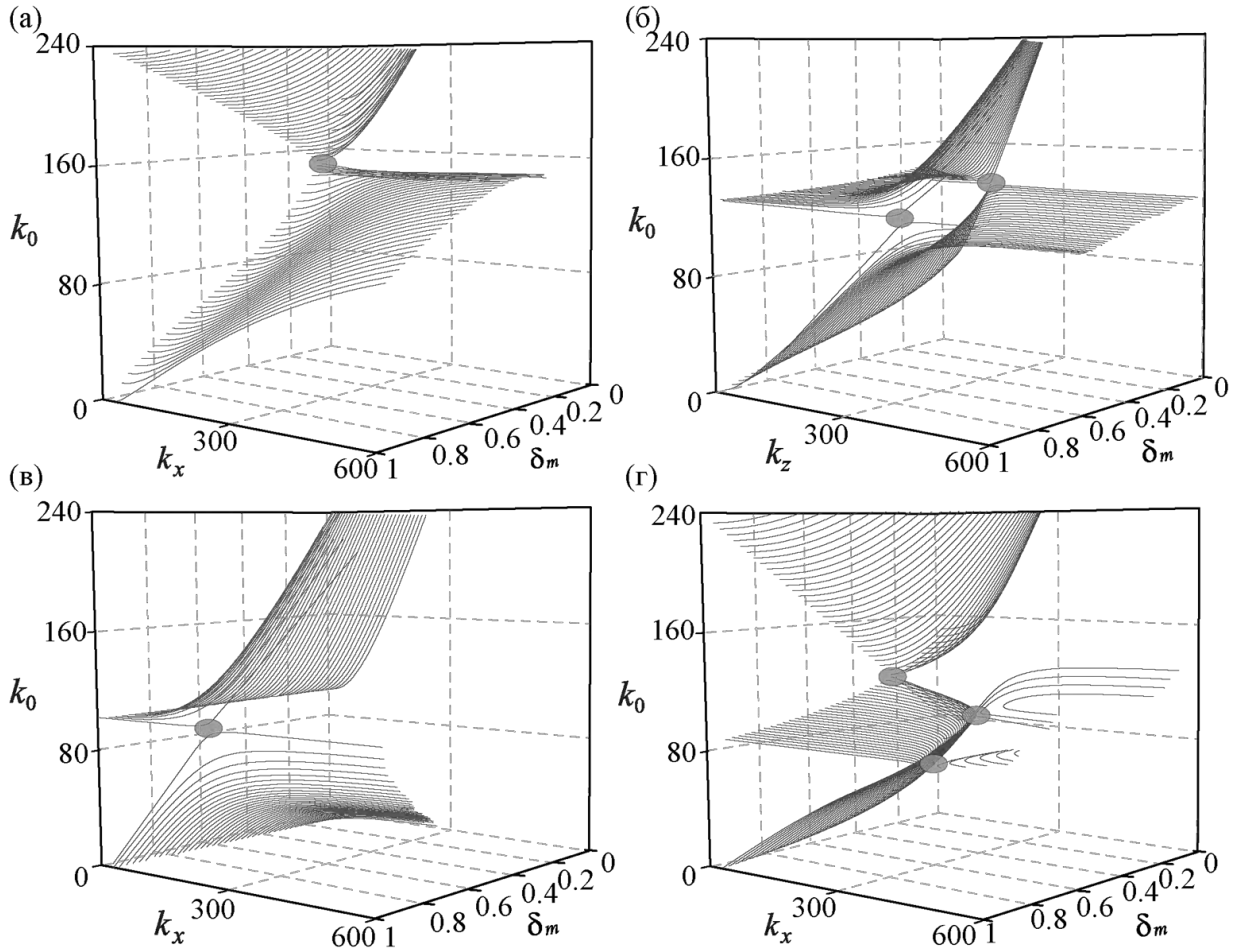


Рис. 7 Набір дисперсійних кривих об'ємних поляритонів у залежності від величини фактору заповнення  $\delta_m$ : (а) геометрія Фойгта (ТЕ поляризація); (б) геометрія Фарадея (незвичайні об'ємні поляритони); (в, г) полярна геометрія (звичайні (в) та незвичайні (г) об'ємні поляритони)

Під час розв'язку оптимізаційної задачі, характеристичні резонансні частоти для магнітної та напівпровідникової підсистем, а також період результуючої композитної структури було зафіксовано, а оптимальний баланс між фракціями  $\delta_m$  та  $\delta_s$  ( $\delta_m = d_m/L$ ,  $\delta_s = d_s/L$  та  $\delta_m + \delta_s = 1$ ) визначвся шляхом перебору товщин магнітного та напівпровідникового шарів у періоді надрешітки. В якості цільової функції було вибрано ефективні відносні діелектричну  $\epsilon_v = \epsilon_{xx} + \epsilon_{xj}^2/\epsilon_{ii}$  та магнітну  $\mu_v = \mu_{xx} + \mu_{xj}^2/\mu_{ii}$  проникності ( $i = j = y$  для геометрій Фойгта та Фарадея та  $i = x$ ,  $j = z$  для полярної геометрії) через те, що вони повністю характеризують властивості електромагнітних хвиль, які поширюються в гіроелектромагнітному середовищі, що досліджується.

Виявлено екстремальні стани (критичні точки), які притаманні, як дисперсійним кривим поверхневих, так і об'ємних поляритонів. Для прозорості, регіони в яких спостерігаються екстремальні стани (ефекти кросингу й анти-

кросингу дисперсійних кривих), позначено на Рис. 6 та 7 за допомогою зафарбованих еліптичних областей. Виявлені екстремальні стани було однозначно класифіковано з використанням концепції, що базується на теорії критичних точок Морса з теорії катастроф. У межах кожної критичної точки визначено силу взаємодії мод і напрямки їх поширення.

У четвертому розділі «Матеріальна та хвилеводна дисперсія у структурах заповнених композитним гіроелектромагнітним середовищем» будується електродинамічна модель і проводиться аналіз взаємодії електромагнітного поля з метаматеріалом, що є бігіротропним середовищем скінченної товщини, а також з хвилеводними системами, що заповнені таким середовищем, див. Рис. 8 (а) та 8 (б), відповідно.

У першій частині розділу предметом розгляду є дрібно-шарувате періодичне

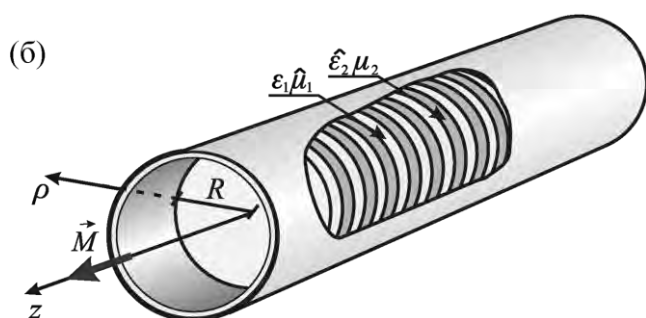
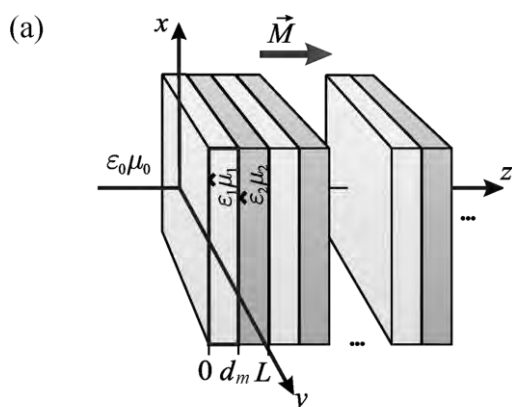


Рис. 8 Схематичне зображення (а) поздовжньо намагніченого шаруватого середовища ферит-напівпровідник та (б) круглого хвилеводу повністю заповненого таким гіроелектромагнітним середовищем

(з періодом  $L = d_m + d_s \ll \lambda$ ) середовище, яке отримано шляхом чергування магнітних (з матеріальними параметрами  $\epsilon_1, \hat{\mu}_1$ ) та напівпровідникових (з матеріальними параметрами  $\hat{\epsilon}_2, \mu_2$ ) шарів. Середовище є нескінченим вздовж вісі  $x$  та  $y$ , але має скінчену товщину вздовж вісі  $z$ .

Для знаходження поля, що відбилось та пройшло, було використано метод ефективного середовища та метод матриць передачі. Вивчено спектральні характеристики гомогенізованого гіроелектромагнітного середовища поблизу частоти «гіротропної недійсності»  $f_{gn}$ , де значення реальних частин ефективних діелектричної та магнітної проникностей є близькими до нуля. Виявлено, що при похилому падінні монохроматичної плоскої хвилі на гіроелектромагнітний шар, значення коефіцієнтів пропускання та відбиття на частоті «гіротропної недійсності» залишаються майже незмінними в широкому діапазоні кутів падіння, аж до кутів ковзання, як це наведено на Рис. 9. Завдяки тому, що на цій частоті хвильові опори гіротропного середовища та вільного простору узгоджені між собою, коефіцієнт відбиття незначний в усьому діапазоні кутів падіння. Отриманий ефект має важливе практичне значення, та зокрема може бути використаний для проектування напівпрозорих екранів і оптичних покриттів без відбиття.

Далі у розділі розглянуто розсіяння тривимірною гауссового хвильового пучка на скінченному гіроелектромагнітному шарі в умовах «гіротропної недійсності».

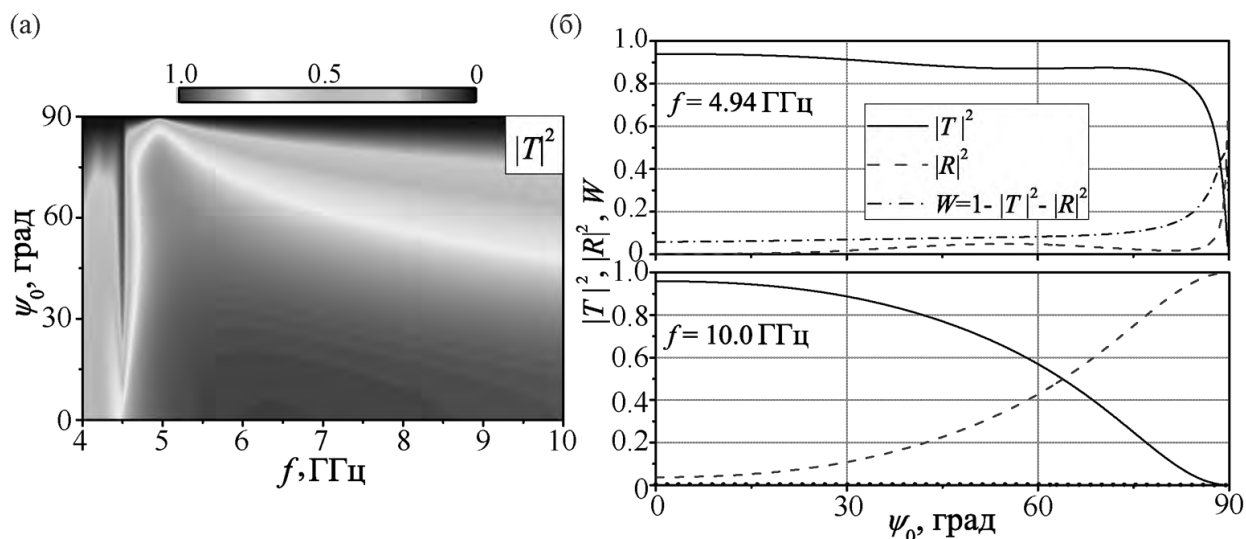


Рис. 9 (а) Залежність коефіцієнту пропускання від частоти та кута падіння плоскої монохроматичної хвилі для еквівалентного гіроелектромагнітного шару зі скінченою товщиною (2.5 мм). (б) Кутові залежності коефіцієнтів пропускання, відбиття та поглинання на частотах  $f_{gn} = 4.94$  ГГц та  $f = 10$  ГГц

Виявлено, що в цьому випадку, пучок може проходити крізь таке середовище, зберігаючи свої параметри (такі як, ширина (діаметр) та форма пучка) незмінними навіть при похилому падінні, за винятком частини енергії поглиненої в матеріалі середовища, як це зображено на Рис. 10.

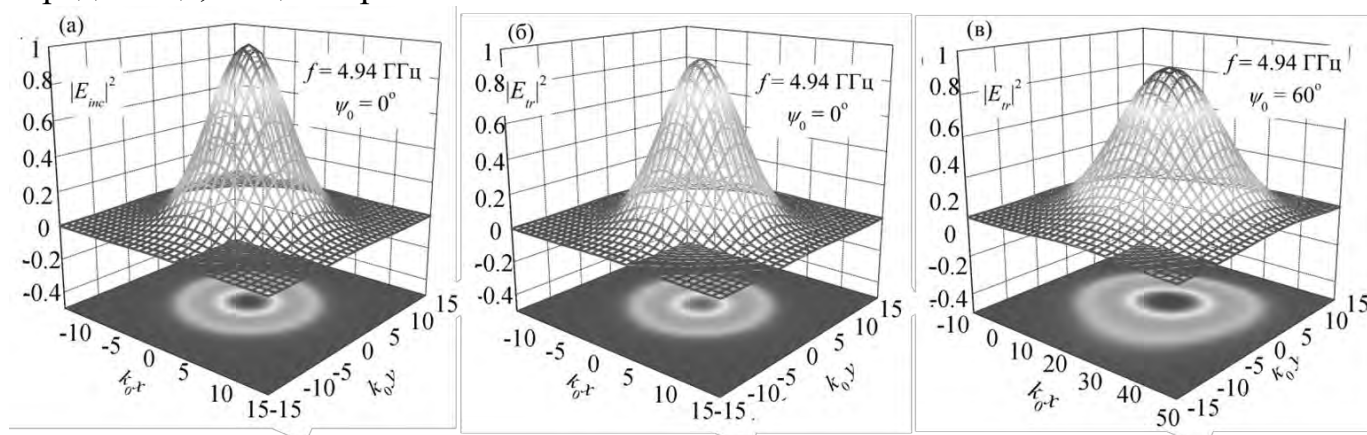


Рис. 10 Тривимірний розподіл абсолютної величини поля (а)  $|E_{inc}|^2$  падаючого пучка та (б)–(д)  $|E_{tr}|^2$  пучка, що пройшов через середовище

У подальшій частині розділу, досліджуються дисперсійні характеристики круглого металевого хвилеводу з радіусом  $R$  повністю заповненого повздовжньо намагніченим дрібно-шаруватим середовищем ферит-напівпровідник (Рис. 8 (б)). У довгохвильовому наближенні, початкову задачу зведено до визначення дисперсійних характеристик круглого хвилеводу, заповненого однорідним анізотропним (гіроелектромагнітним) середовищем (з ефективними проникностями  $\hat{\epsilon} = \{\epsilon, i\epsilon_a, 0; -i\epsilon_a, \epsilon, 0; 0, 0, \epsilon_{\parallel}\}$  та  $\hat{\mu} = \{\mu, i\mu_a, 0; -i\mu_a, \mu, 0; 0, 0, \mu_{\parallel}\}$ ), оптична вісь якого співпадає з віссю хвилеводу (тобто, з віссю  $z$ ). Метод розв'язку цієї задачі полягає в отриманні хвильових (характеристичних) рівнянь відносно поздовжніх компонент електромагнітного поля всередині такого гіротропного хвилеводу, з урахуванням граничних умов на ідеально провідних стінках хвилеводу. Добре

відомо, що дисперсійні характеристики будь-якої хвилевідної системи суттєво залежать, як від геометричних параметрів хвилеводу, так і від електромагнітних властивостей матеріалу заповнення. Особливо це критично у випадку коли дисперсійні залежності діелектричної та/або магнітної проникностей матеріалу заповнення характеризуються наявністю деяких екстремальних станів, які можуть спричинити появу сильної матеріальної дисперсії. Таким чином при вивченні комбінованого впливу геометричних та матеріальних параметрів хвилеводу на його дисперсійні особливості, найбільш цікавим є частотний діапазон який включає характеристичні резонансні частоти, як магнітної, так і напівпровідникової підсистем композиційного середовища.

У роботі для класифікації гібридних мод було обрано схему допоміжного хвилеводу з ізотропним заповненням, згідно з якою, поблизу частот відсічки його ТЕ та ТМ моди трансформуються до HE та EH мод гіротропного хвилеводу, відповідно. У загальному випадку у хвилеводі з гіротропним заповненням для кожної варіації поля по азимуту ( $\pm n$ ) та радіусу ( $m$ ) є два незалежних розв'язки дисперсійного рівняння. Ці розв'язки формують відповідні набори гібридних мод з асиметричним ( $n \neq 0$ ) та симетричним ( $n = 0$ ) розподілом поля в поперечному перетині хвилеводу [173]. Серед асиметричних мод, моди  $HE_{nm}^+$  та  $EH_{nm}^+$  відносяться до хвиль з правостороннім обертанням ( $n > 0$ ), тоді як  $HE_{nm}^-$  та  $EH_{nm}^-$  моди називаються хвилями з лівостороннім обертанням ( $n < 0$ ). У випадку симетричних мод верхній знак «+» або «-» відсутній.

З одночасного аналізу дисперсійних залежностей ефективних поперечних проникностей  $\mu_{\perp} = \mu - \mu_a^2/\mu$ ,  $\varepsilon_{\perp} = \varepsilon - \varepsilon_a^2/\varepsilon$  (Рис. 11 (а)) та ефективного показника заломлення необмеженого гіроелектромагнітного середовища  $\eta^{\pm} = \sqrt{(\mu \pm \mu_a)(\varepsilon \pm \varepsilon_a)}$  (Рис. 11 (б)) було визначено умови для регіонів існування власних хвиль хвилеводу.

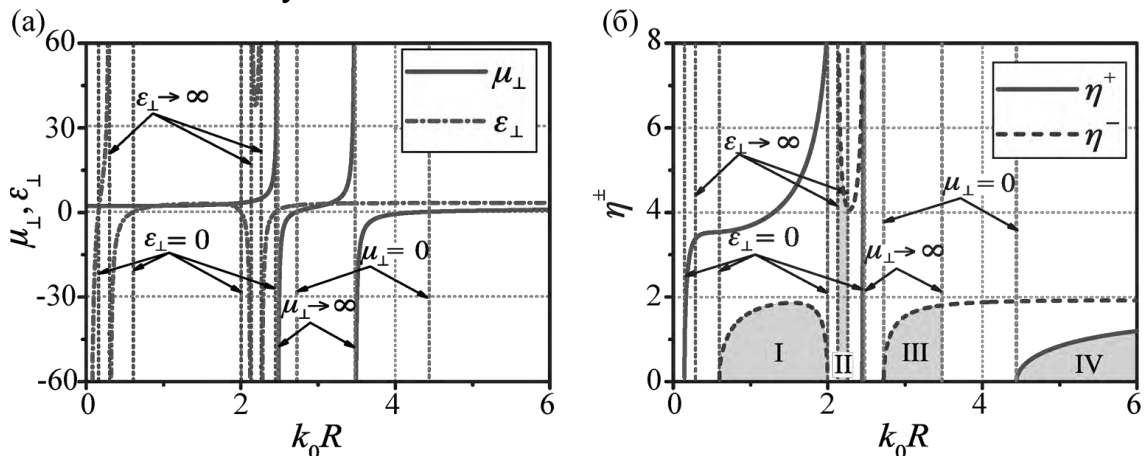


Рис. 11 Дисперсійні залежності (а) ефективних поперечних магнітної  $\mu_{\perp}$  та діелектричної  $\varepsilon_{\perp}$  проникностей та (б) дійсної частини показника заломлення віднесеного до власних хвиль гіроелектромагнітного середовища з правою (верхній знак «+») та лівою (верхній знак «-») круговими поляризаціями. Геометричні параметри шарів є  $d_m/L = d_s/L = 0.5$

А саме, враховуючи екстремальні стани для узагальнених матеріальних параметрів  $\mu_{\perp}$  та  $\varepsilon_{\perp}$  у поєднанні з умовами існування кругополяризованих власних

хвиль у необмеженому гіроелектромагнітному середовищі (тобто, враховуючи умову  $\text{Im}(\eta^\pm) = 0$ ), було отримано чотири окремі частотні регіони існування власних хвиль хвилеводу, Регіони I – IV на Рис. 11 (б).

Отримано дисперсійні криві гібридних мод нижчих типів ( $n = 0, \pm 1$ ) які притаманні кожному з регіонів існування (Рис. 12). Виявлено, що дисперсійні залежності власних хвиль у такій хвилеводній системі суттєво відрізняються від дисперсійних характеристик мод у звичайних діелектричних, феритових і плазмових хвилеводах.

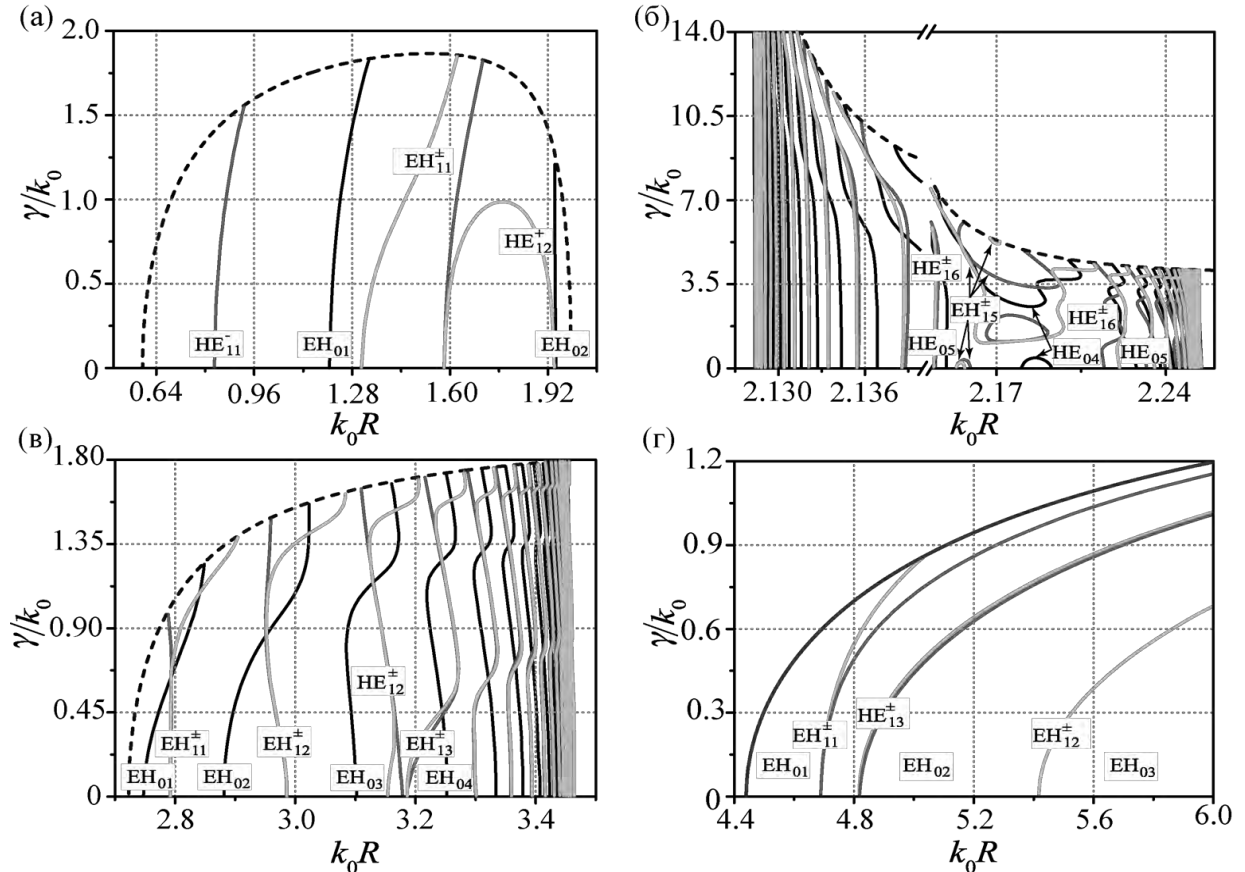


Рис. 12 Дисперсійні криві асиметричних  $\text{HE}_{nm}^\pm$  та  $\text{EH}_{nm}^\pm$  і симетричних  $\text{HE}_{0m}$  та  $\text{EH}_{0m}$  гібридних мод нижчих типів ( $n = 0, \pm 1$ ) у круглому хвилеводі радіусом  $R = 2.0$  см, який повністю заповнений гіроелектромагнітним середовищем без втрат. Верхній знак «+» в аббревіатурах мод відповідає хвилям з правостороннім обертанням, в той час як знак «-» відповідає хвилям з лівостороннім обертанням. Вкладки (а–г), стосуються Регіонів I – IV (Рис. 11 (б))

Продемонстровано, що одночасна наявність гіромагнітних і гіроелектричних ефектів у хвилеводній системі, забезпечує можливість суттєвого контролю (керування) дисперсійними характеристиками гібридних мод хвилеводу. Зокрема, виявлено умови для одномодового режиму роботи хвилеводу, з підтримкою ізолюваних мод  $\text{EH}_{01}$  та  $\text{HE}_{11}^-$  у різних частотних діапазонах (Рис. 13). Отримані регіони знаходяться далеко від характерних частот феромагнітного та плазмового резонансів базових матеріалів, тому в їх межах очікується низький рівень втрат потужності при поширенні хвиль.

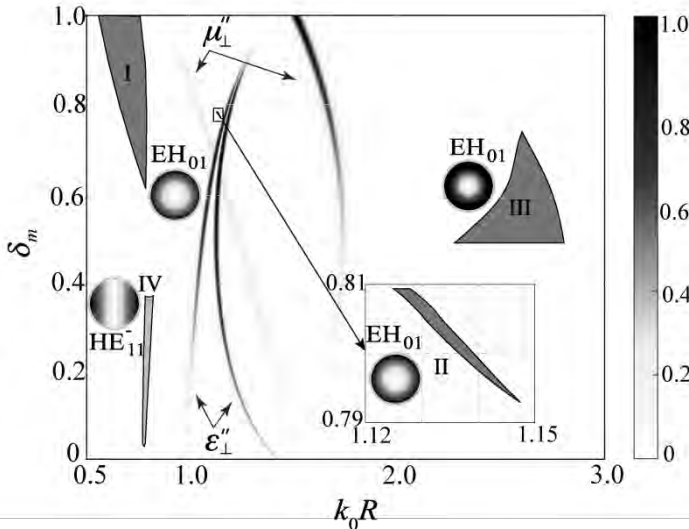


Рис. 13 Частотні регіони (позначені I-IV) де спостерігаються одномодові  $HE_{11}^-$  та  $EH_{01}$  режими роботи круглого хвилеводу з радіусом  $R = 1.0$  см у залежності від фактору заповнення  $\delta_m$ . Також включено дисперсійні залежності уявних частин ефективних поперечних магнітної  $\mu_{\perp}''$  та діелектричної  $\epsilon_{\perp}''$  проникностей

замінена гомогенізованим середовищем тензорами відносних ефективних

$$\hat{\epsilon}_{eff} = \{\epsilon_{xx}, \epsilon_{xy}, 0; -\epsilon_{yx}, \epsilon_{yy}, 0; 0, 0, \epsilon_{zz}\}$$

та магнітної  $\hat{\mu}_{eff} = \{\mu_{xx}, \mu_{xy}, 0; -\mu_{yx}, \mu_{yy}, 0; 0, 0, \mu_{zz}\}$  проникностей, дисперсійні залежності компонент цих тензорів наведено на Рис. 14 (г).

Шляхом розв'язку рівнянь Максвелла з застосуванням відповідних граничних і початкових умов було отримане бікватратне рівняння (відоме як рівняння Френеля), яке визначає деяку поверхню четвертого порядку в координатному просторі  $k_x, k_y$  та  $k_z$  (так званий –  $k$ -простір). Таку поверхню називають *ізочастотною поверхнею*, або, альтернативно, поверхнею хвильових векторів чи хвильовою поверхнею Френеля. Математичні властивості ізочастотних поверхонь однозначно визначають, як закономірності поширення електромагнітних хвиль у довільному середовищі, так і хвильові явища на межі розділу середовищ і дозволяють ідентифікувати такі фізичні ефекти як: конічна рефракція, невзаємне й однонаправлене поширення хвиль у середовищі, відсутність чи повне відбиття хвиль та багато інших.

У загальному випадку середовища без втрат, отримана ізочастотна поверхня відповідає чисто дійсним кореням дисперсійного рівняння, і відповідно до прийнятої термінології, один з таких коренів описує звичайні хвилі, тоді як інший корінь відповідає незвичайним хвилям. В окремих випадках, коли один з коренів є чисто уявною величиною, то на заданій частоті існує лише одна ізочастотна поверхня. У той же час, при наявності втрат у матеріалі середовища, компоненти

У п'ятому розділі «Топологічні переходи ізочастотних поверхонь пов'язаних із хвильовою дисперсією в гіротропних середовищах» вивчаються топологічні переходи ізочастотних поверхонь електромагнітних хвиль, які поширюються в необмежній періодичній (вздовж вісі  $y$ ) надрешітці сформованій на базі магнітного (ферит) і напівпровідникового шарів, що знаходиться під впливом зовнішнього статичного магнітного поля  $\vec{M}$  (Рис. 14 (а)). Зокрема розглядаються як середовища із внутрішніми (матеріальними) втратами, так і середовища без матеріальних втрат.

По аналогії з Розділами 3 та 4, в якості матеріалів для базових шарів надрешітки обрано  $BaCO$  та  $Si$ . З використанням методу ефективного середовища, композитна дрібношарувата структура еквівалентно (Рис. 14 (б)), яке характеризується ефективними діелектричної

та магнітної проникностей, дисперсійні залежності

тензорів відносних ефективних діелектричної  $\hat{\epsilon}_{eff}$  та магнітної  $\hat{\mu}_{eff}$  проникностей стають комплексно-значними величинами, тобто  $\epsilon_{ij} = \epsilon'_{ij} + i\epsilon''_{ij}$  та  $\mu_{ij} = \mu'_{ij} + i\mu''_{ij}$  ( $i, j = x, y, z$ ). У результаті, всі чотири корені рівняння також є комплексними величинами ( $\kappa_i = \kappa'_i + i\kappa''_i, i = 1, 2, 3, 4$ ) та описують поширення комплексних хвиль. Слід зазначити, що в дисертації використано класифікацію згідно з якою вся множина комплексних хвиль поділяється на два класи: дійсні ( $\kappa''_i > 0$ , фізичний розв'язок рівняння Френеля) та уявні ( $\kappa''_i < 0$ ) хвилі, в залежності від того, як змінюються їх амплітуди при поширенні в середовищі.

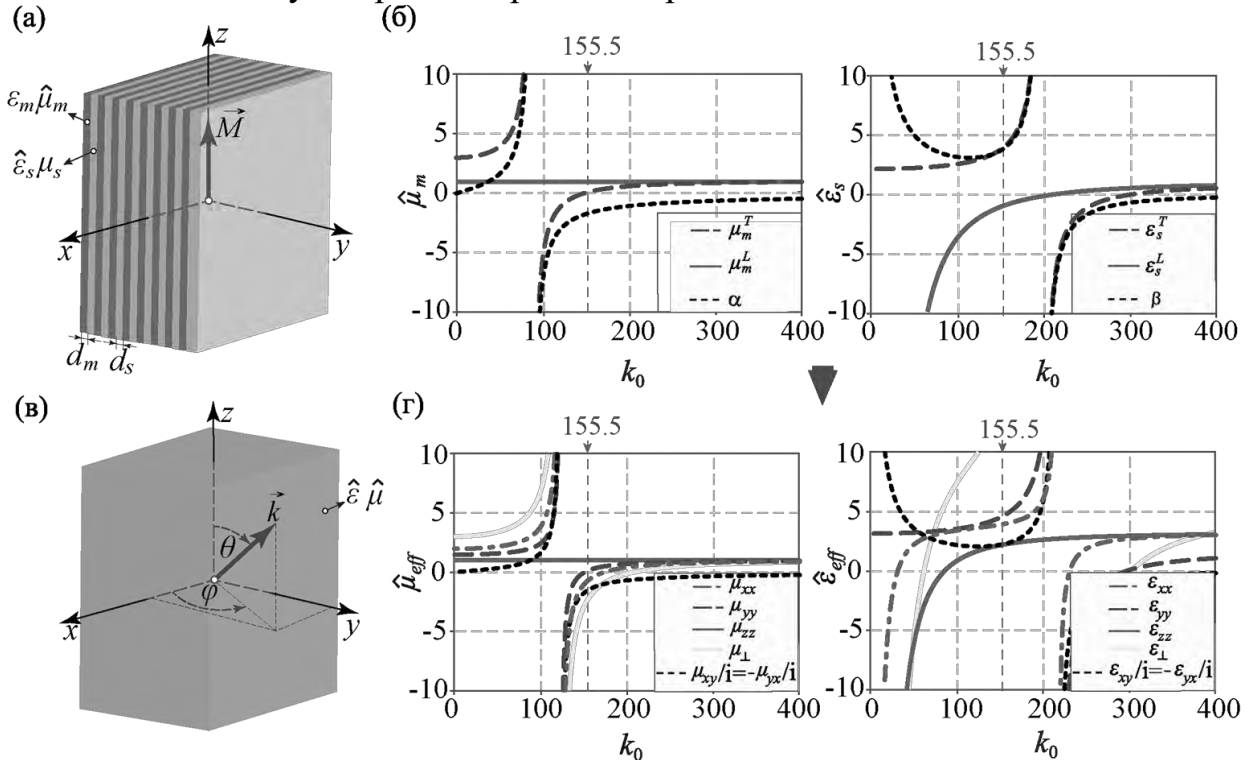


Рис. 14 Схематичне зображення: (а) магнітно-напівпровідникової надрешітки що знаходиться під дією зовнішнього статичного магнітного поля, та (в) результуючого гомогенізованого середовища. Дисперсійні залежності (дійсні частини) компонент тензорів: (б) магнітної  $\hat{\mu}_m$  та діелектричної  $\hat{\epsilon}_s$  проникностей магнітного та напівпровідникового шарів надрешітки, відповідно; (г) відносних ефективних магнітної  $\hat{\mu}_{eff}$  та діелектричної  $\hat{\epsilon}_{eff}$  проникностей гомогенізованого середовища, яке характеризується наступною величиною факторів заповнення  $\delta_m = \delta_s = 0.5$

Далі в розділі досліджено характеристики гомогенізованого середовища та вказано, що вони однозначно визначаються значеннями принципних компонент ефективних тензорів  $\mu_{xx}$ ,  $\mu_{yy}$  та  $\epsilon_{zz}$ . Виявлено регіони які відповідають різним топологічним властивостям ізочастотних поверхонь, та вказано, що топологічні переходи відбуваються при конкретних значеннях фактору заповнення  $\delta_m$  коли принципіві компоненти змінюють свій знак на протилежний. Такі значення  $\delta_m$  відокремлюють одне від одного топологічно відмінні набори розв'язків дисперсійного рівняння. Знайдено умови для критичних точок, де відбуваються топологічні переходи.

У випадку середовища без матеріальних втрат, отримано топологічні переходи ізочастотних поверхонь незвичайних хвиль від закритого еліпсоїду до відкритих



гіперболоїдів типу I та II. Крім того вперше, виявлено існування бігіперболічної форми ізочастотної поверхні (Рис. 15 (г)), яка є новим класом топології хвильової дисперсії.

Далі у розділі, досліджено магнітно-індуковані топологічні переходи ізочастотних поверхонь незвичайних хвиль. Вперше продемонстровано, що поблизу частоти феромагнітного резонансу, ізочастотна поверхня незвичайних хвиль має форму конусу, розрізаного на дві (бі-гіперболічно-подібна ізочастотна поверхня, Рис. 15 (а, в)) або чотири частини (тетра-гіперболічно-подібна ізочастотна поверхня, Рис. 15 (б)), які орієнтовані вздовж напрямку прикладеного, до надрешітки, зовнішнього статичного магнітного поля. Вказано, що отримані ізочастотні поверхні зберігають свою гіперболічну форму, навіть при внесенні матеріальних втрат до системи, але при цьому зазнають певних деформацій.

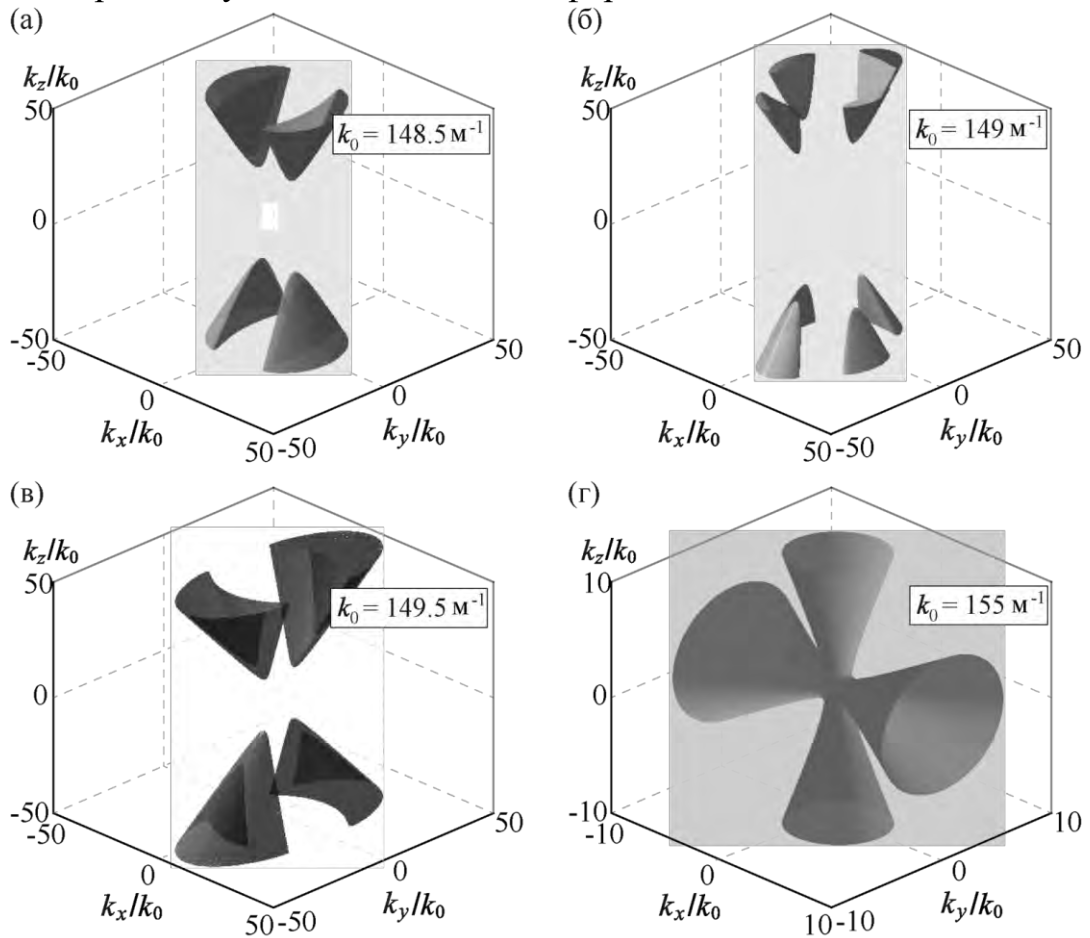


Рис. 15 Ізочастотні поверхні для незвичайних хвиль, що поширюються в двовісному гіроелектромагнітному середовищі без втрат, для декількох обраних значень  $k_0$ . (а, в) бі-гіперболічно-подібні,  $\mu_{xx} < 0$ ,  $\mu_{yy} < 0$  та  $\varepsilon_{zz} < 0$  (б) тетра-гіперболічно-подібна  $\mu_{xx} < 0$ ,  $\mu_{yy} < 0$  та  $\varepsilon_{zz} < 0$ ; (г) бі-гіперболічна поверхня  $\mu_{xx} < 0$ ,  $\mu_{yy} > 0$  та  $\varepsilon_{zz} < 0$

У наступній частині розділу, досліджено поведінку ізочастотних поверхонь звичайних і незвичайних хвиль при наявності внутрішніх втрат у матеріалах установчих шарів надрешітки та виявлено, що матеріальні втрати в базових напівпровідниковому та магнітному шарах мають значний вплив на дисперсійні залежності незвичайних хвиль. Зокрема, для таких хвиль мають місце топологічні

переходи, індуковані втратами, як це наведено на Рис. 16. Вперше продемонстровано, що індуковані втратами топологічні переходи, від гіперболоїду типу I до бігіперболоїду відбуваються у межах частотного діапазону, де реальна частина щонайменше однієї діагональної компоненти тензорів магнітної чи діелектричної проникностей наближається до нуля, в той час як її уявна частина є значною.

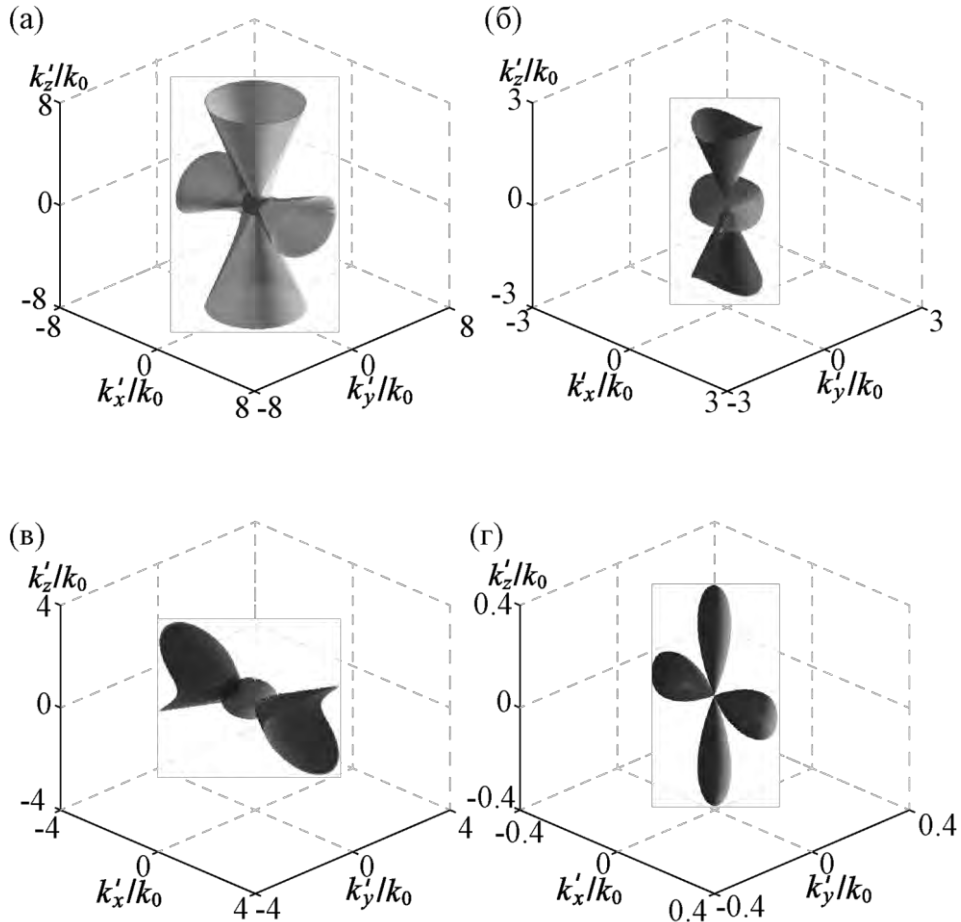


Рис. 16 Демонстрація індукованих втратами топологічних переходів ізочастотних поверхонь (дійсні частини) об'ємних хвиль, що поширюються в надгратці, матеріали шарів якої характеризуються внутрішніми втратами, при фіксованому значенні параметру  $\delta_m = 0.06$ . (а)  $b = 1 \times 10^{-4}$ ,  $\nu = 1 \times 10^{-2}$  ГГц; (б)  $b = 1 \times 10^{-2}$ ,  $\nu = 1 \times 10^{-2}$  ГГц; (в)  $b = 1 \times 10^{-4}$ ,  $\nu = 2$  ГГц; (г)  $b = 2 \times 10^{-2}$ ,  $\nu = 2$  ГГц

Отримані унікальні дисперсійні характеристики гіперболічного метаматеріалу можуть бути використані для проектування пристроїв субхвильової передачі зображень, які долають традиційний дифракційний бар'єр, маршрутизаторів оптичних сигналів, оптичних поглиначів та резонаторів.

У шостому розділі «Дисперсія та особливості розсіяння електромагнітних хвиль на напівпровідникових нанонитках з графеновим покриттям» вивчено дисперсійні характеристики електромагнітних хвиль у напівпровідникових нанонитках із однорідним графеновим покриттям (моношар графену), та виявлено особливості розсіяння електромагнітних хвиль на таких електродинамічних структурах та на їх кластерах.

У першій частині розділу, досліджено дисперсійні особливості комплексних хвиль, що притаманні циліндричному хвилеводу, який являє собою

напівпровідникову нанонитку, покриту однорідним графеновим шаром, як це зображено на Рис. 17. Зважаючи на азимутальну симетрію хвилеводу, використано циліндричну систему координат  $(\rho, \phi, z)$  у якій вісь симетрії нанонитки співпадає з віссю  $z$ .

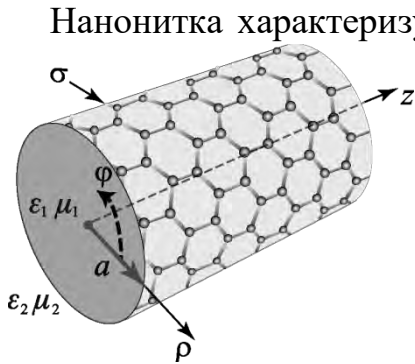


Рис. 17 Схематичне зображення напівпровідникової нанонитки, що покрита однорідним графеновим шаром

Нанонитка характеризується радіусом  $a$  та діелектричною  $\epsilon_1$  і магнітною  $\mu_1$  проникностями. Хвилеводну структуру оточує середовище з матеріальними параметрами  $\epsilon_2$  та  $\mu_2$ . Вважаємо, що хвилевод функціонує в терагерцовому діапазоні частот:  $10 \leq f \leq 250$  ТГц. Ігноруючи ефект квантової товщини графену  $t_g$  (як відомо,  $t_g < 1$  нм), графенове покриття розглядалось, як нескінченно тонкий шар з товщиною  $t_g \rightarrow 0$ , що характеризується макроскопічною поверхневою провідністю  $\sigma$ , яку отримано з формул Кубо. У загальному випадку, провідність  $\sigma$  є функцією кутової частоти  $\omega = 2\pi f$ , хімічного потенціалу  $\mu_c$ , температури навколишнього середовища  $T$  та швидкості розсіяння носіїв заряду  $\Gamma$ , що дозволяє ефективно керувати її величиною, у тому числі динамічно.

Електромагнітні хвилі поширюються у хвилеводі вздовж напрямку вісі  $z$ , тоді вектори електричного та магнітного полів можна записати наступним чином:

$$\vec{A}(\rho, \phi, z, t) = \vec{A}(\rho) \exp[i(m\phi + \beta z - \omega t)], \quad (3)$$

де  $\vec{A}(\cdot)$  – приймає значення  $\vec{H}(\cdot)$  або  $\vec{E}(\cdot)$ ,  $m = 0, 1, 2, \dots$  – азимутальний індекс моди, та  $\beta$  – комплексна (поздовжня) стала поширення.

Для отримання розв'язку крайової задачі була використана методика, що розроблена для визначення режимів функціонування циліндричного діелектричного хвилеводу, покритого резистивною плівкою. Ця процедура передбачає попереднє визначення компонент електромагнітного поля всередині ( $\rho < a$ ) та зовні ( $\rho > a$ ) діелектричного хвилеводу, з подальшим застосуванням граничних умов, які полягають у безперервності тангенціальних компонент електромагнітного поля на стінці хвилеводу покритій резистивною плівкою (при  $\rho = a$ ). З урахуванням того факту, що нескінченно тонкий графеновий шар діє як резистивна плівка з поверхневою провідністю  $\sigma$ , граничні умови, для межі розділу хвилеводна структура/вільний простір, мають наступний вигляд:

$$E_{z1} = E_{z2}; \quad E_{\phi 1} = E_{\phi 2}; \quad H_{z2} - H_{z1} = -\sigma E_{\phi 1}; \quad H_{\phi 2} - H_{\phi 1} = \sigma E_{z1}. \quad (4)$$

Після застосування граничних умов (4) початкову задачу було зведена до  $4 \times 4$  матриці невідомих коефіцієнтів. Характеристичне рівняння для власних хвиль було отримано з умови, що детермінант такої матриці дорівнює нулю. Його розв'язок дає залежність комплексної сталої поширення  $\beta = \beta' + i\beta''$  від частоти та геометричних параметрів хвилеводу, як для несиметричних гібридних  $EH_{mn}$  та  $HE_{mn}$  мод, та аксіально-симетричних  $TM_{0n}$  та  $TE_{0n}$  мод так і для поверхневих хвиль  $TE$  та  $TM$  поляризації.

З математичної точки зору, напівпровідникова нанонитка з графеновим покриттям є відкритою електродинамічною структурою, для якої крайова задача

описується не самоузгодженим оператором. У загальному випадку, власні значення такої не самоузгодженої крайової задачі є комплексними величинами. Таким чином, головною особливістю структури, що досліджується, є обов'язкова наявність комплексних хвиль у її спектрі; тобто хвиль, що поширюються через нанонитку з графеновим покриттям та характеризуються комплексними сталими поширення, навіть у випадку, коли втрати у матеріалі з якого виготовлено хвилевод відсутні.

Далі в розділі, було детально проаналізовано отримані дисперсійні характеристики електромагнітних хвиль у нанонитці з однорідним графеновим покриттям, і проведено детальну класифікацію всього спектру хвилеводних мод з використанням теорії комплексних хвиль. Основну увагу було сконцентровано на трьох конкретних типах хвиль, а саме: на захоплених поверхневих хвилях, які відповідають спрямованим модам хвилеводу, витікаючих хвилях (моди випромінювання) та поверхневих плазмонах.

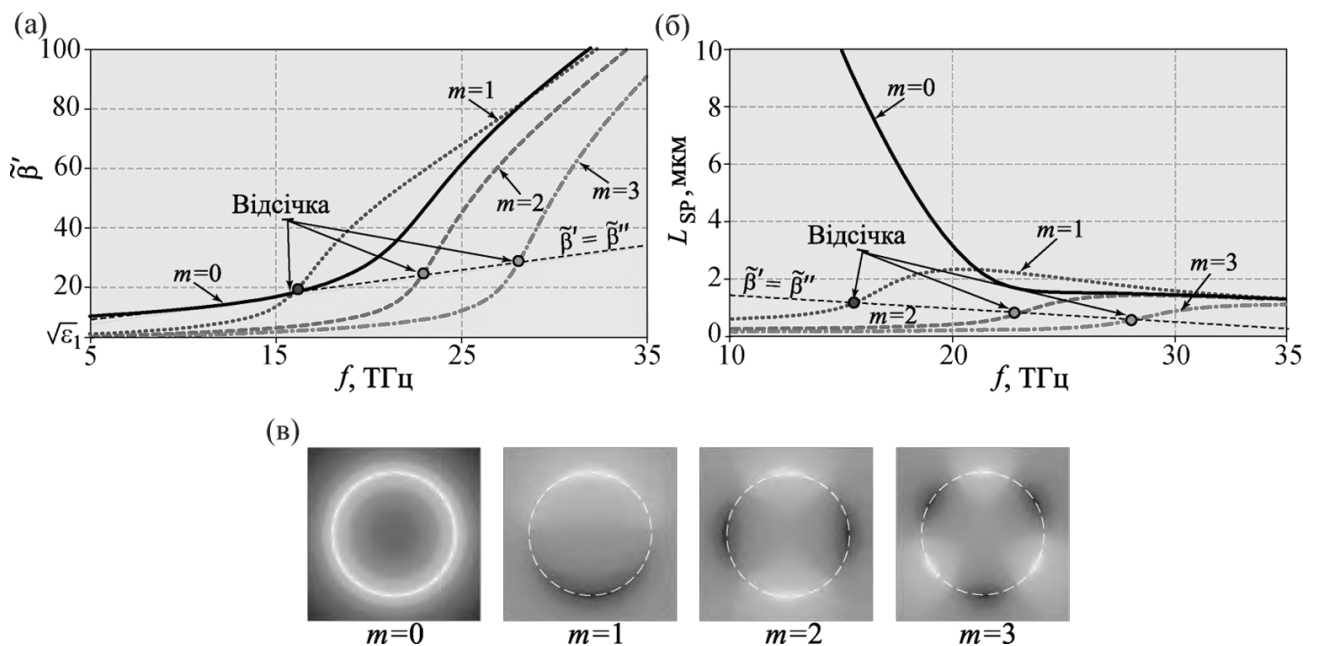


Рис. 18 Дисперсійні криві, (б) довжина шляху пробігу та (в) розподіли електричного поля (дійсна частина компоненти  $E_z$ ) поверхневих плазмонів ТМ поляризації в нанонитці ( $a = 50$  нм) з графеновим покриттям для різних значень азимутального індексу моди  $m$ , що отримані на частоті  $f = 30$  ТГц

Зокрема, досліджено особливості поширення ТМ поверхневих плазмонів у нанонитці з однорідним графеновим покриттям, див., Рис. 18. Виявлено два субрегіони існування поверхневих плазмонів, де вони з'являються як спрямовані та реактивні хвилі. Крім того, вперше коректно визначено умови відсічки для поверхневих плазмонів ТМ поляризації вищого порядку. Показано, що точки на дисперсійних кривих, які відповідають відсічці, знаходяться не горизонтальній лінії з деяким сталим значенням ефективного модового індексу  $\tilde{\beta}' = \beta'/k_0$ , натомість вони розташовані на похилій лінії, яка відповідає умові  $\tilde{\beta}' = \tilde{\beta}''$ .

Далі в розділі було вивчено електромагнітний відгук, як одиночних нанониток, так і кластерів нанониток з графеновим покриттям, при падінні на них лінійно поляризованої плоскої хвилі в терагерцовому діапазоні частот (Рис. 19).

Детально досліджено особливості розсіяння на кластерах, які містять або дві (димер), або три (тример) напівпровідникові нанонитки з однорідним графеновим покриттям (див., Рис. 19). У димері нанонитки розташовано симетрично відносно вісі  $x$  або  $y$  на відстані  $d$  одна від одної. У свою чергу, тример сформовано трьома нанонитками, центри яких лежать у вершинах трикутника, з кутом  $\varphi$  при вершині, основа якого може бути орієнтована вздовж вісі  $x$  або  $y$ .

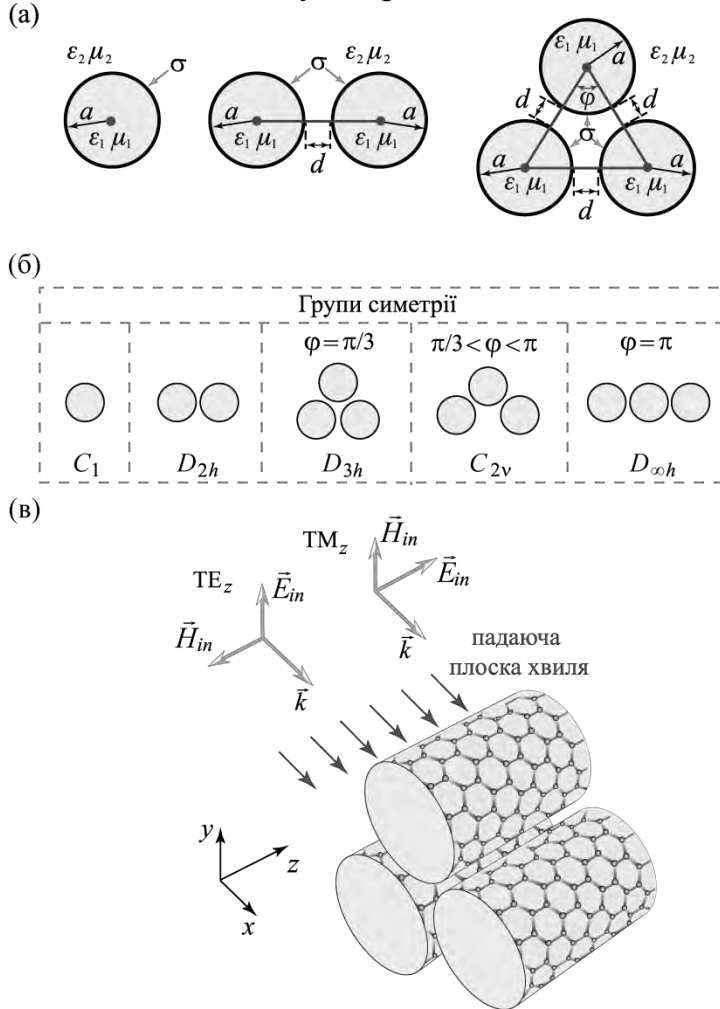


Рис. 19 (а) Схематичне зображення поперечних перетинів у площині  $x - y$  для одиночної нанонитки, димера та тримера. (б) Класифікація можливих дизайнів кластерів у відповідності до точкової групи симетрії. (в) Геометрія задачі розсіяння з відображенням  $TE_z$  та  $TM_z$  поляризації первинної плоскої електромагнітної хвилі, яка нормально падає на кластер напівпровідникових нанониток з однорідним графеновим покриттям

компонентами,  $\vec{E}_{in}^{TE} = \{0, E_y, 0\}$  та  $\vec{H}_{in}^{TE} = \{0, 0, H_z\}$  або  $TM_z$  поляризацію з польовими компонентами  $\vec{E}_{in}^{TE} = \{0, 0, E_z\}$  та  $\vec{H}_{in}^{TE} = \{0, H_y, 0\}$ . Розв'язок задачі розсіяння було отримано з використанням положень теорії Мі та формалізму розсіяння хвиль на системах паралельних циліндрів.

Усі можливі дизайни таких кластерів було класифіковано у відповідності до точкової групи симетрії (для класифікації використовуються символи Шенфліса). Відповідно до обраної класифікації (див., Рис. 19 (б)), одиночна нанонитка належить до так званої тривіальної групи симетрії  $C_1$ ; димер – до групи симетрії  $D_{2h}$ ; у свою чергу симетричний тример (рівносторонній трикутний кластер;  $\varphi = \pi/3$ ) належить до групи симетрії  $D_{3h}$ , тоді як асиметричний тример належить або до групи  $C_{2v}$  ( $\Lambda$ -подібний кластер;  $\pi/3 < \varphi < \pi$ ), або до групи  $D_{\infty h}$  (лінійний ланцюжок з трьох нанониток;  $\varphi = \pi$ ).

Хвильовий вектор  $\vec{k}$  падаючої електромагнітної хвилі спрямовано вздовж вісі  $x$ , тобто хвиля падає по нормалі до вісі нанониток  $\vec{k} \perp z$ , як зображено на Рис. 19 (в). У такому випадку, початкова задача розпадається на дві самостійні задачі для ортогонально поляризованих хвиль, кожна з яких розглядалася окремо. Таким чином, первинна (опромінююча) хвиля може мати або  $TE_z$  поляризацію (з польовими

В якості наступного кроку було розглянуто особливості розсіяння первинної хвилі на окремій нанонитці, димері та симетричному тримері. Виявлено, що у випадку падіння на структуру плоскої хвилі з  $TM_z$  поляризацією, спектри розсіяння всіх структур поведуться аналогічно та мають єдину область невидимості, як це наведено на Рис. 20 (а). Крім того, в отриманих спектрах розсіяння не виявлено резонансних піків, тобто локалізовані поверхневі плазмони не збуджуються в такому випадку.

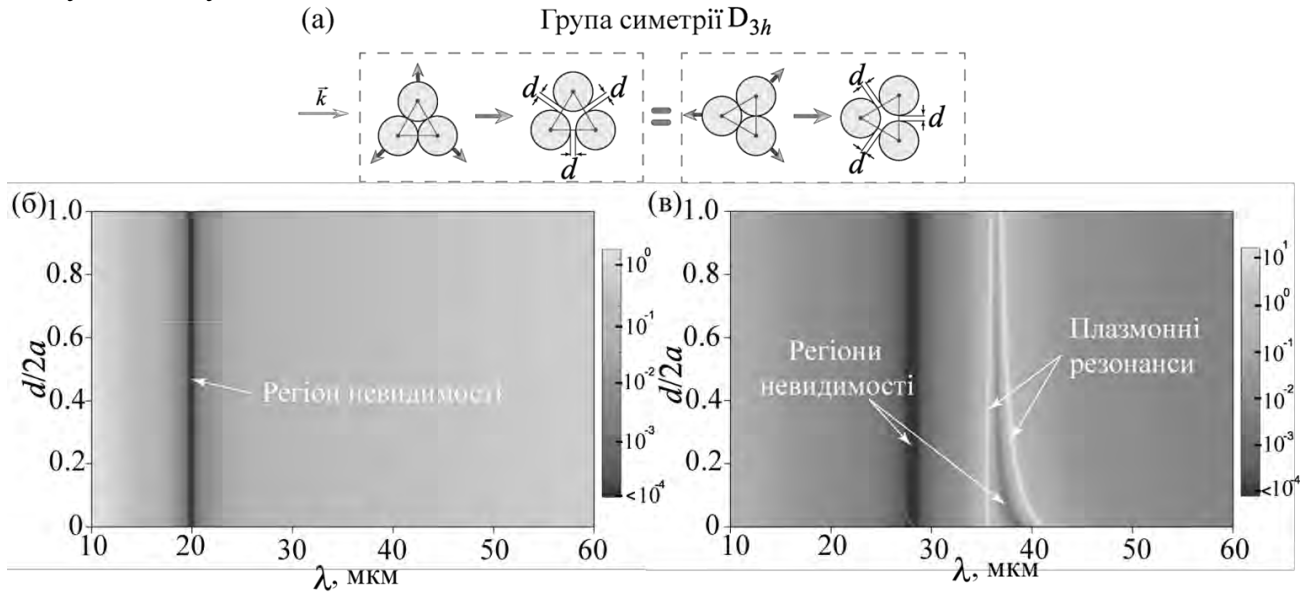


Рис. 20 Схематичне зображення двох просторових положень симетричного тримера відносно напрямку поширення падаючої плоскої хвилі. Залежності спектрів нормованого поперечного перетину розсіяння  $NSCS^{TM}$  (б) та  $NSCS^{TE}$  (в) від відстані  $d$  між окремими нанонитками для симетричного  $D_{3h}$  тримеру

У той же час продемонстровано, що при падінні на структуру плоскої хвилі  $TE_z$  поляризації, спектри розсіяння одиночної нанонитки ( $C_1$ ) й обох кластерів нанониток  $D_{2h}$  (димер) і  $D_{3h}$  (симетричний тример) помітно відрізняються один від одного (Рис. 20 (б)). Зокрема, у кластерах, зв'язок між плазмонними модами окремих нанониток призводить до появи декількох плазмонних резонансів та областей невидимості в спектрах розсіяння. Наприклад, у спектрі розсіяння тримеру  $D_{3h}$  є дві області невидимості та два основні резонансні піки. Показано, що такий спектр розсіяння не залежить від просторової орієнтації тримера через високу симетрію групи  $D_{3h}$ .

Насамкінець, досліджено вплив пониження точкової симетрії тримеру на його спектр розсіяння, як це наведено на Рис. 21. Вперше виявлено, що такий вплив призводить до появи додаткових областей невидимості в спектрі розсіяння. Отриманий ефект обумовлено гібридизацією плазмонних станів у кластері нанониток при порушенні його симетрії. Всі виявлені плазмонні стани класифіковано з використанням теорії гібридизації плазмонів.

Наведені результати показують, що нормовані перетини розсіяння кластерів нанониток можуть бути суттєво модифіковані шляхом порушення симетрії, внесеної в структуру кластера. Цей ефект обумовлений збудженням «темних» плазмонних мод і спостерігається лише для падаючої хвилі з  $TE_z$  поляризацією.

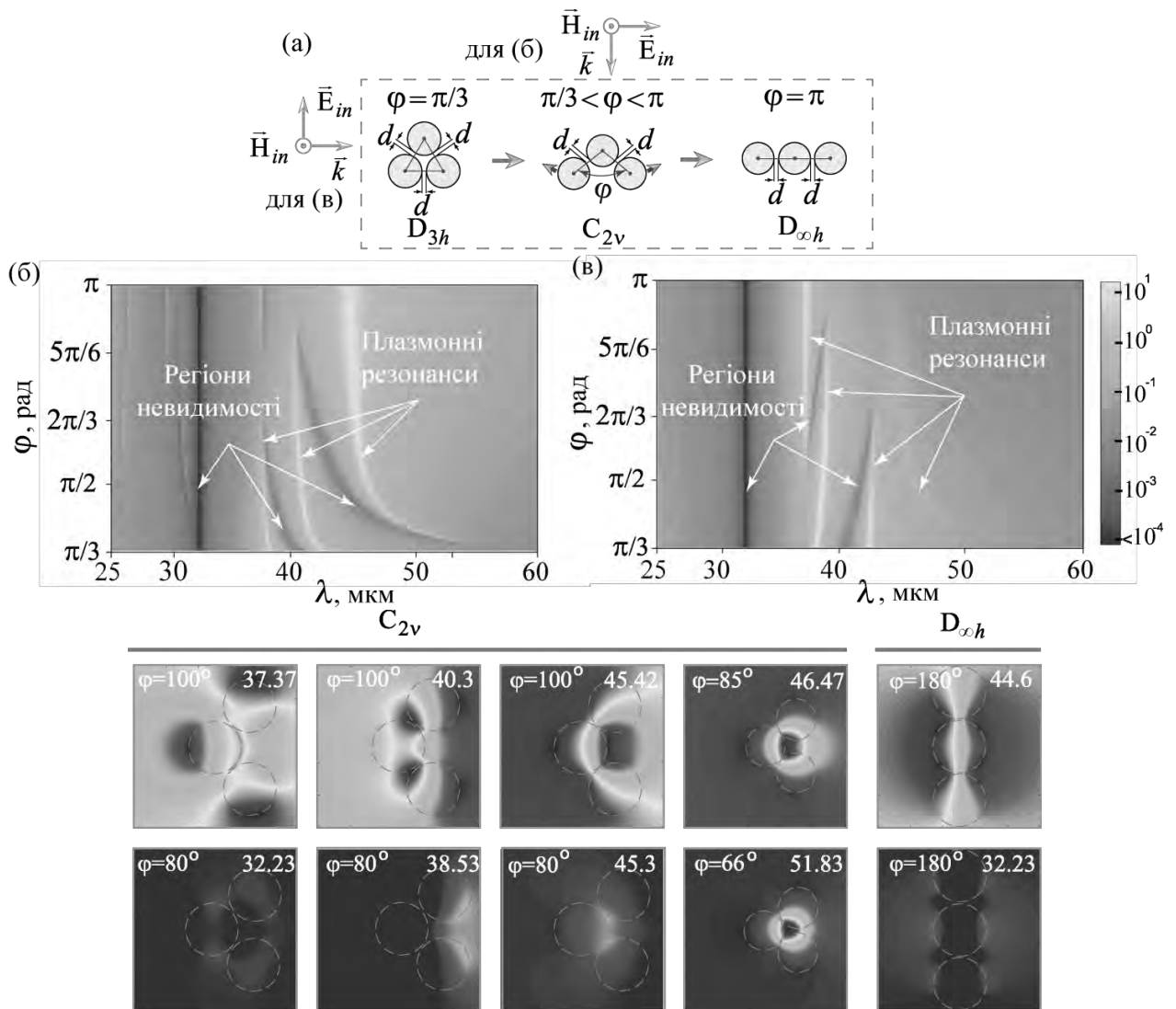


Рис. 21 Схематичне зображення пониження точкової групи симетрії тримера ( $D_{3h} \rightarrow C_{2v} \rightarrow D_{\infty h}$ ), при збільшенні значення кута  $\varphi$ , при його вершині. Залежності спектру NSCS<sup>TE</sup> від значення кута  $\varphi$  для асиметричного тримера, базу якого орієнтовано вздовж вісі  $x$  (б) та вісі  $y$  (в), відповідно. В обох випадках  $d = 10$  нм. (г) Розподіли ближнього поля, які відповідають обраним точкам на площині  $\varphi - \lambda$  з вкладки (б). Значення довжини хвилі  $\lambda$  (в мкм) та кута при вершині тримера  $\varphi$  наведено у правому та лівому верхніх кутах кожного з розподілів поля, відповідно

## ВИСНОВКИ

Дана дисертаційна робота була представлена в рамках актуального напрямку сучасної радіофізики, який стосується синтезу штучних композитних матеріалів і теоретичного й експериментального дослідження їх електродинамічних властивостей. Композитні матеріали містять оптично-активні включення та можуть функціонувати на однакових фізичних принципах у різних діапазонах частот від НВЧ до оптичного. Метою роботи була розробка й аналіз в рамках єдиної уніфікованої теорії низки фізико-математичних моделей взаємодії електромагнітного поля зі штучними композитними середовищами, з урахуванням впливу анізотропії середовища та його просторової неоднорідності на закономірності поширення та розсіяння електромагнітних хвиль, з метою досягнення найбільш ефективного способу керування їх дисперсійними

характеристиками. Автором були розвинуті й узагальнені існуючі методи аналізу штучних середовищ зі складною просторовою композицією, що в поєднанні з підходами сучасної радіофізики та математичної фізики, дозволило виявити низку нових фізичних ефектів і закономірностей поширення та розсіяння електромагнітних хвиль на таких композитних структурах. Вклад дисертанта в розвиток даного напрямку, можна сформулювати наступним чином:

1. Розроблено фізико-математичні моделі періодичних та аперіодичних планарних брегівських структур, і створено ефективні числові алгоритми для дослідження дисперсійних і спектральних характеристик електромагнітних хвиль у таких композитних середовищах та:

– *Вперше*, для генерації аперіодичних шаруватих середовищ і планарних брегівських хвилеводів на їх базі, запропоновано використовувати самогенеруючі класичну й узагальнену послідовності Колакоскі, що дозволило отримати більш ефективні всеспрямовані відбивачі випромінювання на їх базі, в порівнянні з іншими аперіодичними середовищами.

– Проведено порівняльний аналіз який вказує не те, що використання аперіодичної оболонки, в дизайні планарних брегівських хвилеводів, дозволяє проводити більш гнучку селекцію спрямованих мод і відкриває більш широкі можливості для керування поляризаційно-залежними ефектами, в порівнянні з періодичними дизайнами. *Вперше* виявлено, що в брегівських хвилеводах з аперіодичним порядком чверть-хвильових шарів у оболонці, частоти відсічки спрямованих мод зсунуто в область більш високих частот. Крім того, аперіодична конфігурація оболонки має суттєвий вплив на хроматичну дисперсію, та призводить до червоного зсуву довжини хвилі нульової дисперсії.

2. Створено загальну теорію та отримано оригінальний розв'язок задачі, щодо визначення дисперсійних характеристик об'ємних і поверхневих поляритонів, які поширюються в композитному середовищі сформованому у вигляді надрешітки ферит-напівпровідник, що знаходиться під впливом зовнішнього статичного магнітного поля. Розв'язок задачі отримано в загальному вигляді для довільного напрямку прикладеного зовнішнього статичного магнітного поля по відношенню як до межі розділу середовищ, так і до напрямку поширення електромагнітної хвилі.

– *Вперше* виявлено, що в двох окремих конфігураціях намагніченості, а саме в полярній геометрії та геометрії Фойгта, *регіони існування поверхневих та об'ємних поляритонів можуть частково, або повністю, перекриватись*. Показано, що таке співіснування об'ємних і поверхневих поляритонів у межах одного і того ж самого діапазону частот і хвильових векторів при фіксованому значенні прикладеного зовнішнього статичного магнітного поля може бути отримано шляхом відповідного вибору матеріальних і геометричних параметрів надрешітки. Виявлено ефекти кросингу й антикросингу, які спостерігаються для дисперсійних кривих як поверхневих, так і об'ємних поляритонів, що поширюються в такому ММ. Отримані ефекти ідентифіковано та досліджено з використанням аналітичної теорії критичних точок Морса та в межах областей взаємодії мод було визначено силу їх зв'язку між собою.



– Гіперболічні ММ на базі дрібно-шаруватих середовищ, що досліджені в дисертації, демонструють низку аномальних дисперсійних характеристик, зокрема нетипові топологічні переходи ізочастотних поверхонь незвичайних об'ємних хвиль, що поширюють в них. У роботі *вперше* отримано *бігіперболічну та тетрагіперболічно-подібну форми ізочастотних поверхонь*. Вказано на можливість ефективного керування ізочастотними поверхнями об'ємних хвиль, як шляхом зміни уявних частин принципів компонент тензорів ефективних діелектричної та магнітної проникностей (*топологічні переходи індуковані втратами*), так і зміни частоти, або величини прикладеного до структури зовнішнього статичного магнітного поля (*магнітно-індуковані топологічні переходи*). Зокрема, *вперше* продемонстровано, що індуковані втратами топологічні переходи, від гіперболоїда типу I до бігіперболоїду відбуваються в межах частотного діапазону, де реальна частина щонайменше однієї діагональної компоненти тензорів магнітної чи діелектричної проникностей наближається до нуля, в той час як її уявна частина є значною.

3. Створено та досліджено фізико-математичні моделі які описують розсіяння електромагнітних хвиль на ММ, що є бігіротропним середовищем скінченної товщини. Розглянуто два загальні випадки, коли композитну структуру розташовано у вільному просторі та в круглому металевому хвилеводі. Розроблено ефективні числові алгоритми для дослідження дисперсійних характеристик електромагнітних хвиль у таких електродинамічних структурах.

– Вивчено особливості розсіяння плоских монохроматичних хвиль і просторово-обмежених хвильових пучків на бігіротропному середовищі в околиці частоти «гіротропної недійсності». *Вперше* продемонстровано, що тривимірний хвильовий гаусів пучок може проходити крізь таке середовище зберігаючи свої параметри (такі як, ширина (діаметр) і форма пучка), що залишаються незмінними навіть при похилому падінні пучка, за винятком частини енергії поглиненої в матеріалі середовища.

– Детально вивчено вплив комбінованої хвилеводної та матеріальної дисперсії на характеристики гібридних режимів круглого металевого хвилеводу, який повністю заповнений поздовжньо намагніченим гіроелектромагнітним середовищем. Виявлено, що дисперсійні залежності власних хвиль у такій хвилеводній системі різко відрізняються від дисперсійних характеристик мод у звичайних діелектричних, феритових і плазмових хвилеводах. Продемонстровано, що одночасна наявність гіромагнітних і гіроелектричних ефектів у хвилеводній системі, забезпечує можливість ефективного керування дисперсійними характеристиками гібридних мод хвилеводу. Зокрема, виявлено умови для одномодового режиму роботи хвилеводу, з підтримкою ізольованих мод  $EH_{01}$  та  $HE_{11}^-$  у різних частотних діапазонах.

4. Узагальнено існуючу теорію та створено фізико-математичні моделі для вивчення дисперсійних характеристик комплексних електромагнітних хвиль у напівпровідникових нанонитках з однорідним графеновим покриттям (моношар графену). Виявлено особливості розсіяння електромагнітних хвиль на таких

електродинамічних структурах та їх кластерах. Розроблено низку ефективних математичних алгоритмів.

– З використанням положень теорії комплексних хвиль, вивчено дисперсійні особливості всього спектру хвилеводних мод, що можуть існувати в нанонитці з однорідним графеновим покриттям і проведено їх детальну класифікацію. Виявлено два регіони існування поверхневих плазмонів ТМ-поляризації, де вони виникають у вигляді спрямованих та реактивних хвиль. *Вперше* коректно визначено умови відсічки для поверхневих плазмонів ТМ поляризації вищого порядку, що поширюються в нанонитці з графеновим покриттям.

– З використанням положень теорії Мі та формалізму розсіяння хвиль на системах паралельних циліндрів досліджено електромагнітний відгук, як одиночних нанониток з однорідним графеновим покриттям, так і кластерів таких нанониток, при падінні на них лінійно поляризованих плоских хвиль у терагерцовому діапазоні частот. *Вперше* виявлено, що пониження точкової симетрії кластеру призводить до появи додаткових областей невидимості в спектрі розсіяння, такий ефект обумовлено гібридизацією плазмонних станів у кластері нанониток при порушенні його симетрії. Виявлені плазмонні стани класифіковано з використанням теорії гібридизації плазмонів.

Отримані в дисертаційній роботі результати являються важливими, як для прикладних досліджень направлених на створення високоефективних пристроїв фотоніки, мікроелектроніки, оптоелектроніки та плазмоніки, так і для поглиблення фундаментальних знань про особливості взаємодії електромагнітного випромінювання зі штучними композитними середовищами

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

*публікації у фахових виданнях України:*

1. **Фесенко ВІ.** Метаматеріали для ТГц та оптичного діапазонів. Огляд сучасного стану та вибір об'єктів дослідження. Радіотехніка. 2010;162:48–56.
2. **Фесенко ВІ, Шульга СН.** Пассивный преобразователь поляризации ближнего ИК-диапазона на основе мезопористого кремния. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2010;927:43–47.

*публікації у зарубіжних спеціалізованих виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus:*

3. Tuz VR, **Fesenko VI.** Magnetically induced topological transitions of hyperbolic dispersion in biaxial gyrotropic media. J. Appl. Phys. 2020;128:013107.
4. Shcherbinin VI, Moskvitina YK, **Fesenko VI**, Tuz VR. Dual-polarized all-angle cloaking of a dielectric nanowire by helical graphene ribbons. Phys. Rev. B. 2019;100(3):035428.
5. **Fesenko VI**, Tuz VR. Lossless and loss-induced topological transitions of isofrequency surfaces in a biaxial gyroelectromagnetic medium. Phys. Rev. B. 2019;99(9):094404.
6. Fedorin IV, **Fesenko VI**, Tuz VR, Khrypunov G, Khrypunova A. Topological transition points in a magnetic-semiconductor periodic structure in an external magnetic field. Acta. Phys. Pol. A. 2019;135(4):626–631.

7. Yu P, **Fesenko VI**, Tuz VR. Dispersion features of complex waves in a graphene-coated semiconductor nanowire. *Nanophotonics*. 2018; 7(5):925–934.
  8. Shcherbinin VI, **Fesenko VI**, Tuz VR. Low-loss forward and backward surface plasmons in a semiconductor nanowire coated by helical graphene strips. *J. Opt. Soc. Am. B*. 2018;35(8):2066–2074.
  9. **Fesenko VI**, Shcherbinin VI, Tuz VR. Multiple invisibility regions induced by symmetry breaking in a trimer of subwavelength graphene-coated nanowires. *J. Opt. Soc. Am. A*. 2018;35(10):1760–1768.
  10. Tuz VR, Fedorin IV, **Fesenko VI**. Bi-hyperbolic isofrequency surface in a magnetic-semiconductor superlattice. *Opt. Lett.* 2017;42(21):4561–4564.
  11. Tuz VR, **Fesenko VI**, Fedorin IV, Sun HB, Han W. Coexistence of bulk and surface polaritons in a magnetic-semiconductor superlattice influenced by a transverse magnetic field. *J. Appl. Phys.* 2017;121(10):103102.
  12. **Fesenko VI**, Tuz VR, Fedorin IV, Sun HB, Shulga VM, Han W. Control of single-mode operation in a circular waveguide filled by a longitudinally magnetized gyroelectromagnetic medium. *J. Electromagn. Waves Appl.* 2017;31(13):1265–1276.
  13. Tuz VR, Fedorin IV, **Fesenko VI**, Sun HB, Shulga VM, Han W. Dispersion peculiarities of hybrid modes in a circular waveguide filled by a composite gyroelectromagnetic medium. *J. Electromagn. Waves Appl.* 2017;31(3):350–362.
  14. Tuz VR, **Fesenko VI**, Fedorin IV, Sun HB, Shulga VM. Crossing and anti-crossing effects of polaritons in a magnetic-semiconductor superlattice influenced by an external magnetic field. *Superlattices Microstruct.* 2017;103:285–294.
  15. **Fesenko VI**, Tuz VR, Shulika OV, Sukhoivanov IA. Dispersion properties of Kolakoski-cladding hollow-core nanophotonic Bragg waveguide. *Nanophotonics*. 2016;5(4):556–564.
  16. **Fesenko VI**, Fedorin IV, Tuz VR. Dispersion regions overlapping for bulk and surface polaritons in a magnetic-semiconductor superlattice. *Opt. Lett.* 2016;41(9):2093–2096.
  17. **Fesenko VI**, Tuz VR. Dispersion blue-shift in an aperiodic Bragg reflection waveguide. *Opt. Comm.* 2016;365:225–230.
  18. **Fesenko VI**. Omnidirectional reflection from generalized Kolakoski multilayers. *Prog. Electromagn. Res. M*. 2015;41:33–41.
  19. **Fesenko VI**. Aperiodic birefringent photonic structures based on Kolakoski sequence. *Waves Random. Complex. Media*. 2014;24(2):174–190.
  20. Iakushev SO, Shulika OV, Sukhoivanov IA, **Fesenko VI**, Andrés MV, Sayinc H. Formation of ultrashort triangular pulses in optical fibers. *Opt. Express*. 2014;22(23):29119–29134.
  21. **Fesenko VI**, Sukhoivanov IA, Shulga SN. Photonic crystals and microresonators based on the anisotropic mesoporous silicon. *Telecomm. Radio. Eng.* 2011;70(4):367–376.
- публікації у розділах книг зарубіжних видавництв:*
22. Tuz VR, Fedorin IV, **Fesenko VI**. Modal phenomena of surface and bulk polaritons in magnetic-semiconductor superlattices. In Ebrahimi F, editor. *Surface Waves; New Trends and Developments*. Rijeka: IntechOpen; 2018. p. 99–125.
  23. Tuz VR, **Fesenko VI**. Gaussian beam tunneling through a gyrotropic-nihility finely-stratified structure. In: Shulika O, Sukhoivanov I, editors. *Contemporary optoelectronics;*

Materials, Metamaterials and Applications. Springer Series in Optical Sciences, vol 199. Dordrecht: Springer; 2016. p. 99–113. (Scopus).

24. **Fesenko VI**, Tuz VR, Sukhoivanov IA Terahertz aperiodic multilayered structure arranged according to the Kolakoski sequence. In: Pereira MF, Shulika O, editors. Terahertz and Mid Infrared Radiation: Detection of Explosives and CBRN (Using Terahertz). NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics. Dordrecht: Springer; 2014. p. 25–32.

25. **Fesenko VI**, Sukhoivanov IA, Shul'ga SN, Andrade Lucio JA. Propagation of electromagnetic waves in anisotropic photonic structures. In: Passaro V, editor. Advances in Photonic Crystals. Rijeka: IntechOpen; 2013. p. 79–105.

#### *патент України*

26. Якушев С, Шуліка О, **Фесенко В**, Сухоіванов І, винахідники; Харківський національний університет радіоелектроніки, правонаступник. Оптичне мікроструктуроване волокно з нормальною дисперсією в ближньому інфрачервоному та видимому діапазонах. Патент України UA 109953 С2. 2015 26 жовтня.

### АНОТАЦІЯ

**Фесенко В. І.** Електромагнітні хвилі у багатокомпонентних штучних композитних матеріалах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – Радіофізика. – Радіоастрономічний інститут НАН України; Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2020.

Дисертаційна робота представлена в рамках актуального напрямку сучасної радіофізики, який стосується синтезу штучних композитних матеріалів і теоретичного й експериментального дослідження їх електродинамічних властивостей. Матеріали, що досліджуються, містять оптично-активні включення та можуть функціонувати на однакових фізичних принципах у різних діапазонах частот від НВЧ до оптичного. Автором були розвинуті й узагальнені існуючі методи аналізу штучних середовищ зі складною просторовою композицією, що в поєднанні з підходами сучасної радіофізики та математичної фізики, дозволило виявити низку нових фізичних ефектів і закономірностей поширення та розсіяння електромагнітних хвиль на таких композитних структурах.

Отримані в дисертаційній роботі результати являються важливими, як для прикладних досліджень спрямованих на створення вискоелективних пристроїв фотоніки, мікроелектроніки, оптоелектроніки та плазмоніки, так і для поглиблення фундаментальних знань про особливості взаємодії електромагнітного випромінювання зі штучними композитними середовищами.

**Ключові слова:** дисперсійні характеристики, гіперболічна дисперсія, ізочастотні поверхні, періодична структура, метаматеріали, напівпровідникова нанонитка, графен, поверхневі хвилі, анізотропія, гіротропія, метод матриць передачі, метод ефективного середовища.

**ABSTRACT**

***Fesenko V. I. Electromagnetic waves in multicomponent artificial composite media. – Qualification scientific work is as a manuscript.***

Thesis for a Doctoral Degree in Physics and Mathematics, Speciality 01.04.03 – Radiophysics. – Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine; V. N. Karazin Kharkiv National University Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kharkiv, 2020.

The thesis is related to a new field of modern radiophysics, which concerns with the synthesis of artificial composite structures and theoretical and experimental study of their electromagnetic properties. The structures under study are composed of optically active components and can operate on the same physical principles in different frequency ranges from microwave to visible. The aim of the work is to develop and analyze, in the framework of a unified theory, several physical and mathematical models of the electromagnetic field interaction with artificial composite media. In the proposed models, the effects of anisotropy and spatial inhomogeneity on the characteristics of electromagnetic wave propagation in the studied artificial structures are accounted for. The author develops and generalizes the existing methods of analysis of artificial structures with complex spatial composition. These methods combined with other approaches of modern radiophysics and mathematical physics allow revealing a number of new physical conditions and effects of propagation and scattering of electromagnetic waves in such composite structures.

A comprehensive analysis of the electromagnetic properties of periodic and aperiodic planar Bragg reflectors and planar Bragg reflection waveguides is carried out. The physical and mathematical models as well as efficient numerical algorithms for studying the dispersion and spectral characteristics of such composite structures are developed. It is proposed for the first time to use the self-generating classical and generalized Kolakoski sequences as a forming principle for aperiodic layered media constructing. A dispersion peculiarities of a Bragg reflection waveguide composed of an aperiodic arrangement of the cladding layers are revealed in comparison with characteristics of a waveguide with periodic layers. For the aperiodic waveguides, the blue-shift of the cut-off frequency is observed.

A general theory is developed and an original solution is obtained for the problem related to determining dispersion characteristics of both bulk and surface polaritons propagating through a ferrite-semiconductor superlattice which is influenced by an external static magnetic field. The obtained solution is universal being derived in a general form for an arbitrary direction of the applied external static magnetic field with respect to both the structure interface and the direction of propagation of the electromagnetic wave. The effect of coexistence of bulk and surface polaritons in such a superlattice influenced by an external static magnetic field in the both Voigt and polar geometries is revealed for the first time. It is shown that the conditions for total overlapping of dispersion regions of the simultaneous existence of bulk and surface polaritons can be reached, providing a conscious choice for the constitutive parameters and material fractions for both magnetic and semiconductor layers in the superlattice. It is found out that in an extremely anisotropic medium, the dispersion characteristics of extraordinary bulk waves exhibit a number of unusual behaviors, including atypical topological transitions of isofrequency

surfaces. The conditions for appearance of bi-hyperbolic and tetra-hyperbolic-like forms of isofrequency surfaces are found out for the first time. The loss-induced and magnetically-induced topological transitions of isofrequency surfaces of bulk waves propagating through such an unbounded biaxial gyrotropic medium are demonstrated. It is shown that the loss-induced topological transitions appear in the frequency band where the real part of at least one principal component of the anisotropic constitutive parameter (permittivity or permeability tensor) is close to zero, whereas its imaginary part is high.

The physical and mathematical models describing the scattering of electromagnetic waves on a layer of bigyrotropic medium are developed and studied. The reflection, transmission, and absorption of plane monochromatic waves and wave packets in the bigyrotropic layer are studied in vicinity of the gyrotropic-nihility frequency. It is found out that under the oblique incidence of the spatial plane monochromatic wave on the studied structure, the level of the transmission/reflection remains unchanged almost down to the glancing angles when the gyrotropic-nihility condition for the medium is satisfied. As a result, at the frequency of the gyrotropic-nihility condition, the Gaussian beam can pass through such a system keeping its parameters unchanged (beam width and shape) except of a portion of the absorbed energy even under the oblique incidence of the primary beam. A detailed study of the influence of the combined geometrical and material dispersion on hybrid modes of a circular waveguide which is completely filled by a longitudinally magnetized gyroelectromagnetic medium is performed. It is shown that simultaneous presence of gyromagnetic and gyroelectric effects in the waveguide system can provide substantial control of the dispersion characteristics and field distributions of the supported modes.

The generalization of the existing theory is carried out and original physical and mathematical models are developed for studying the dispersion characteristics of complex electromagnetic waves in semiconductor nanowires with a homogeneous graphene coating. Detailed classification of the waveguide modes is carried out based on a special theory of complex waves. The peculiarities of propagation of the TM modes of surface plasmons are revealed. Two subregions of existence of surface plasmons are found out where they appear as propagating and reactive waves. For the first time, the cutoff conditions for higher-order TM modes of surface plasmons are correctly determined. Based on the obtained results, with the use of the Lorenz–Mie theory and multiple cylinder scattering formalism, scattering characteristics are investigated for both a single nanowire and nanowire clusters (dimer and trimer) illuminated by a linearly polarized plane wave in the terahertz frequency range. The impact of the symmetry lowering in the graphene-coated nanowire trimer on its scattering characteristics is shown. For the first time, in the scattering spectra of the asymmetric trimers, an additional invisibility region is found to exist, where such a region arises due to excitation of a dark mode.

The results obtained in the thesis are important for both theoretical and applied physics with the aim to design highly efficient devices for photonics, microelectronics, optoelectronics, and plasmonics, and for deepening fundamental knowledge about the interaction of electromagnetic waves with artificial composite media.

**Key words:** dispersion characteristics, hyperbolic dispersion, isofrequency surfaces, periodic structures, metamaterials, semiconductor nanowires, graphene, surface waves, anisotropy, gyrotropy, transfer matrix method, effective medium theory.