

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Фесенка Володимира Івановича «Електромагнітні хвилі у багатокомпонентних штучних композитних матеріалах», яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Дисертаційна робота В. І. Фесенка присвячена всебічному теоретичному дослідженню електромагнітних хвиль в багатокомпонентних штучних структурах, які є об'єктом теоретичних та експериментальних досліджень в багатьох провідних наукових центрах світу.

1. Актуальність теми дисертації. Дослідження впливу просторової неоднорідності та анізотропії середовища на особливості розсіювання та розповсюдження електромагнітних хвиль є одним із важливих завдань сучасної радіофізики, яке має як фундаментальне, так і прикладне значення. Це зумовлено потребою створення приладів та пристроїв, в яких будуть використовуватися нові типи штучно створених композитних структур, які доповнюють і розширюють існуючі природні середовища як за діапазоном параметрів, так і за функціональними можливостями. Зокрема, до таких композитних середовищ відносяться фотонні кристали та метаматеріали, електродинамічні властивості яких в переважній мірі зумовлені їх структурою, що дозволяє проводити більш гнучке керування спектральними та дисперсійними характеристиками таких штучних матеріалів шляхом вибору відповідної просторової конфігурації середовища.

Таким чином, всебічний аналіз електродинамічних властивостей штучних композитних матеріалів і структур необхідний для більш глибокого розуміння фізики процесів взаємодії електромагнітного поля з такими середовищами та потребує побудови адекватних фізико-математичних моделей та створення ефективних числових алгоритмів.

З цієї причини становлення та подальший розвиток нового наукового напрямку пов'язаного з всебічним вивченням властивостей штучно створених просторово неоднорідних середовищ, розробка нових та удосконалення існуючих методів їх математичного опису, а також формування цілісної картини про електромагнітні явища в таких структурах, являється актуальним, що і обумовлює **актуальність досліджень**, яким і присвячена дана дисертаційна робота.

2. Характеристика роботи і новизна одержаних результатів. У дисертації, за допомогою як відомих, так і розвинутих в роботі методів аналізу, проведено теоретичні дослідження електродинамічних властивостей низки штучних композитних матеріалів з урахуванням їх анізотропії та просторової неоднорідності. В результаті чого було виявлено ряд

нових ефектів і закономірностей розсіяння та поширення електромагнітних хвиль в таких складних середовищах.

Структура дисертаційної роботи Фесенка В. І. традиційна. Дисертація складається з вступу, шести розділів (оглядового та п'яти розділів з новим матеріалом), висновків, списку використаних джерел, та шести додатків.

Перший розділ присвячено огляду сучасного стану проблематики, що стосується досліджень взаємодії електромагнітних хвиль з композитними штучними середовищами. На підставі проведеного огляду зформульована загальна мета роботи, яка полягає в розробці низки уніфікованих фізико-математичних моделей, які описують взаємодію електромагнітного випромінювання зі штучними середовищами при врахуванні їх анізотропії та просторової неоднорідності, з метою досягнення найбільш ефективного керування просторовими та часовими характеристиками електромагнітних полів. Сформульовано коло задач, які мають як фундаментальне, так і прикладне значення, та розглянуті в наступних п'яти розділах дисертації.

У другому розділі вивчаються особливості взаємодії електромагнітного поля з періодичними та аперіодичними шаруватими середовищами та планарними хвилеводами створеними на їх базі. Дослідження проведено з використанням методу матриць передачі. Вперше, для формування аперіодичних шаруватих середовищ, автором запропоновано використовувати самогенеруючі класичну та узагальнену послідовності Колакоскі. Показано, що такі структури дозволяють ефективно керувати своїми спектральними та дисперсійними характеристиками шляхом спеціального впорядкування їх установчих шарів.

Третій розділ стосується досліджень електродинамічних властивостей дрібно-шаруватого середовища (надгратки) ферит-напівпровідник яке знаходиться під впливом зовнішнього статичного магнітного поля. В довгохвильовому наближенні, з використанням методу ефективного середовища, композитна шарувата структура зведена до однорідного бііротропного середовища яке характеризується тензорами діелектричної та магнітної проникностей.

У цьому ж розділі створено загальну теорію та отримано оригінальне розв'язання задачі по визначенню дисперсійних характеристик поверхневих та об'ємних хвиль які поширюються в такому композитному середовищі. Таке розв'язання задачі є універсальним, тому що його отримано для довільного напрямку прикладеного до структури зовнішнього магнітного поля по відношенню як до напрямку поширення хвиль так і до межі розділу надгратка/вільний простір. Особливу увагу приділено трьом основним магнітооптичним конфігураціям: Фойгта, Фарадея та полярній. Показано що в двох окремих конфігураціях

намагніченості (Фойгта та полярній) спостерігається співпадання регіонів існування об'ємних та поверхневих хвиль. Крім того виявлено ефекти кросингу та антикросингу як в дисперсійних кривих поверхневих так і об'ємних хвиль.

Розсіювання плоских монохроматичних хвиль та тривимірних гаусових пучків на скінченій поздовжньо намагніченій (геометрія Фарадея) дрібно-шаруватій структурі ферит-напівпровідник яку розміщено в вільному просторі досліджено в **четвертому розділі**. Особливу увагу приділено дослідженню спектральних характеристик електромагнітних хвиль на частотах де реальні частини діагональних компонент ефективних тензорів магнітної та діелектричної проникностей одночасно наближаються до нуля в той час як реальні частини їх недіагональних компонент відмінні від нуля (так звана частота «гіротропної-недійсності»). Зокрема, показано, що на такій частоті гаусів пучок може проходити через композитне середовище зберігаючи свої параметри навіть при похилому падінні.

В цьому ж розділі досліджено дисперсійні залежності власних хвиль круглого металевого хвилеводу повністю заповненого таким композитним середовищем. Результати розрахунків вказують на те, що одночасна наявність гіроелектричних та гіромагнітних ефектів у хвилеводній системі дозволяє ефективно керувати дисперсійними характеристиками гібридних хвиль, і зокрема, проводити гнучку селекцію хвилеводних режимів в обраних частотних діапазонах.

Дослідженню топологічних переходів ізочастотних поверхонь електромагнітних хвиль які поширюються в необмеженому двовісному бігіротропному середовищі (гіперболічний метаматеріал) присвячено **п'ятий розділ** дисертації. Дослідження проведено в частотному діапазоні де реальні частини діагональних компонент ефективних тензорів діелектричної та магнітної проникностей гомогенізованого середовища можуть змінювати свій знак на протилежний. Показано, що в такому надзвичайно анізотропному середовищі дисперсійні характеристики об'ємних хвиль мають деякі нетипові властивості. Особливий інтерес представляють отримані автором нові топології ізочастотних поверхонь незвичайних хвиль – бі- та тетра-гіперболічна.

Метою **шостого розділу** дисертації є всебічне дослідження всього спектру комплексних хвиль притаманних субхвильовому напівпровідниковому хвилеводу (нанонитці) з однорідним графеновим покриттям в ТГц діапазоні хвиль. У розділі розроблено низку ефективних фізико-математичних алгоритмів які дозволили отримати деякі нові результати. Зокрема було коректно визначено умови відсічки для поверхневих плазмонів ТМ-поляризації вищого порядку.

Далі в розділі отримано розв'язок задачі розсіяння лінійно-поляризованих плоских хвиль як на окремих нанонитках з однорідним графеновим покриттям, так і на їх субхвильових кластерах. Результати розрахунків показують, що нормовані поперечні перетини розсіяння мають суттєві розбіжності для двох ортогональних поляризацій (TE та TM) падаючого випромінювання. Крім того вони також значно різняться для симетричних та асиметричних кластерів нанониток (тримерів). Зокрема автор виявив, що при пониженні точкової симетрії тримеру в його спектрі розсіяння з'являються додаткові мінімуми (області невидимості), зумовлені гібридизацією плазмонних станів в кластері.

3. Наукова новизна результатів роботи.

Дисертаційна робота Фесенка В. І. присвячена одному із найважливіших напрямків сучасної радіофізики – дослідженню взаємодії електромагнітного поля зі штучно створеними композитними структурованими матеріалами. На мою думку, до найбільш важливих результатів отриманих дисертантом слід віднести такі:

1. Запропоновано новий тип аперіодичних шаруватих середовищ, сформованих на базі послідовності Колакоскі. Показано що в таких структурах ширина спектрального діапазону всеспрямованого відбиття перевищує аналогічне значення для інших типів аперіодичних середовищ, при тих же геометричних і матеріальних параметрах установчих шарів структури.
2. Отримано оригінальне розв'язання задачі по визначенню дисперсійних характеристик об'ємних та поверхневих хвиль які поширюються в надгратці ферит-напівпровідник (одновимірний метаматеріал), яка знаходиться під впливом зовнішнього статичного поля. Отриманий розв'язок є універсальним.
3. На базі побудованої електродинамічної моделі такого метаматеріалу показано, що поверхневі та об'ємні хвилі можуть існувати у межах одного і того ж самого діапазону частот та хвильових векторів.
4. Виявлено нові топології хвильової дисперсії – бі-гіперболічну та тетра-гіперболічну, які притаманні гіперболічному метаматеріалу сформованому в вигляді надрешітки ферит-напівпровідник.
5. Показано, що в умовах «гіротропної недійсності» тривимірний гаусовий хвильовий пучок може проходити через композитне середовище зі збереженням своєї форми, навіть у випадку похилого падіння на структуру.
6. Створено та досліджено фізико-математичну модель, яка описує поширення власних хвиль круглого металевого хвилеводу повністю заповненого дрібно-шаруватою

структурою ферит-напівпровідник, шари якої намагнічені до насичення (геометрія Фарадея).

7. За допомогою ефективних математичних методів створені та досліджені моделі субхвильових напівпровідникових хвилеводів (нанониток) покритих шаром графену.
8. Отримано розв'язання задачі з розсіювання плоских лінійно-поляризованих хвиль на кластерах нанониток з графеновим покриттям. Виявлено ефект появи додаткових областей невидимості в спектрі розсіювання кластеру з трьох нанониток, обумовлений гібридизацією плазмонних станів при порушенні симетрії в такому кластеру.

4. Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих роботах. Наукові положення, які сформульовані в дисертації достатньо повно викладені в 47 публікаціях: а) 21 стаття в спеціалізованих наукових журналах, з яких 2 статті в фахових вітчизняних журналах і 19 статей в закордонних наукових журналах суттєва більшість яких належить до категорій Q1 та Q2: Physical Review Applied, Physical Review B, Nanophotonics, Optics Letters, Optics Express та ін.), б) 4 розділи у монографіях зарубіжних видавництв, в) 21 збірників доповідей на українських і міжнародних конференціях, г) 1 патент України. Автореферат повністю відображає основні положення дисертації та дозволяє оцінити якість та обсяг проведеної автором дисертації роботи. Автореферат не містить інформації яка відсутня в дисертації.

5. Обґрунтованість і достовірність одержаних у дисертації результатів підтверджується коректністю постановок задач; вибором адекватних фізико-математичних моделей; використанням фізично та математично обґрунтованих методів розв'язання задач, що розглядаються, та співставленням отриманих результатів з результатами робіт інших авторів. Слід зазначити, що решта наукових результатів відома фахівцям з електродинаміки комплексних середовищ. Це підтверджується цитуванням публікацій дисертанта в науковій періодиці.

Вважаю, що наукові положення та висновки дисертації являються добре обґрунтованими, а отримані результати є достовірними та мають значний вклад у розвиток сучасної науки.

6. Наукове та практичне значення результатів дисертації. На мій погляд сукупність результатів і висновків дисертаційної роботи Фесенка В.І. може бути кваліфікована як новий та перспективний напрямок сучасної радіофізики, який полягає в створенні та розвитку комплексної теорії електромагнітних хвиль в складно композиційних штучних матеріалах.

Практичне значення дисертації складається в тому, що досліджені в дисертації штучні середовища та отримані результати мають широке практичне застосування. Зокрема вони можуть бути використані для створення інтегрально-оптичних та волоконно-оптичних

пристроїв властивостями яких можна керувати як за допомогою впливу зовнішнього електричного та магнітного полів, так і структурою композитного середовища. Крім того на практичну значимість отриманих результатів вказує і отриманий автором патент України.

7. Зауваження до дисертації не мають принципового характеру, але мають бути зазначені у наступному:

1. Автор не наводить в роботі опис використаних числових алгоритмів, відомості про їх реалізацію та похибки числових обчислень
2. Автор не приводить обґрунтування вибору конфігурацій аперіодичних шаруватих середовищ, які розглянуто в другому розділі дисертації.
3. Крім того, інколи в тексті зустрічаються пропущені знаки пунктуації (які не має сенсу перелічувати), та русизми. Наприклад, автор використовує термін «надрешітка», коли має бути «надгратка».

Однак, вказані недоліки не є принциповими, вони не знижують загальної високої оцінки роботи і не торкаються її принципових положень і висновків.

8. Загальний висновок. Дисертаційна робота Фесенка Володимира Івановича «Електромагнітні хвилі у багатокомпонентних штучних композитних матеріалах», є закінченою самостійною науково-дослідною роботою, яка виконана на високому рівні та включає нові теоретично і практично вагомні результати, достовірність яких обґрунтована. Не маю жодного сумніву, що за тематикою проведених досліджень, змістом і результатами дисертація Фесенка В. І. повністю відповідає паспорту спеціальності 01.04.03 – радіофізика та всім вимогам до докторських дисертацій, а її автор, безперечно, заслуговує на присудження йому вченого ступеня доктора фізико-математичних наук.

Офіційний опонент: провідний науковий співробітник відділу

теорії динамічних властивостей складних систем

Донецького фізико-технічного інституту ім. О. О. Галкіна НАН України

доктор фізико-математичних наук, професор,

лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки

Любчанський І. Л.

Підпис Любчанського Ігоря Леонідовича засвідчую.

Вчений секретар ДонФТІ НАН України,

кандидат технічних наук



Дмитренко В. Ю.

Відрук завершено 12 квітня 2021 р

Вчений секретар спецради