

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Фесенка Володимира Івановича "Електромагнітні хвилі у
багатокомпонентних штучних композитних матеріалах", яку
представлено на здобуття наукового ступеня доктора фізико-
математичних наук за спеціальністю 01.04.03 - радіофізика

1. Актуальність дослідження та зв'язок з науковими програмами, темами.

Сучасний етап у розвитку радіофізики характеризується становленням та стрімким розвитком наукового напрямку який стосується дослідження взаємодії електромагнітних хвиль зі штучними композитними матеріалами, що і є предметом розгляду в представленій дисертаційній роботі. Штучно створені багатокомпонентні структури дозволяють отримати цілий ряд унікальних електродинамічних характеристик, які є недосяжними при використанні звичайних природних матеріалів. Бажані електродинамічні характеристики багатокомпонентного штучного середовища можуть бути отримані на етапі формування шляхом адекватного вибору матеріальних і геометричних параметрів його окремих складових компонент та їх спеціальним просторовим упорядкуванням. Більш того, існує можливість динамічного керування спектральними та дисперсійними характеристиками створеної структури як шляхом зміни температури оточуючого середовища, так і за допомогою прикладених до середовища зовнішніх електричного та магнітного полів. З цією метою в конструкції штучного середовища використовують оптично-активні матеріали, зокрема такі як напівпровідники, ферити, магнітні-напівпровідники та графен.

Всі завдання дисертації спрямовані на вирішення важливої наукової проблеми сучасної радіофізики, яка стосується аналізу і синтезу штучних композитних матеріалів і теоретичного й експериментального дослідження їх електродинамічних властивостей.

Важливість проведених досліджень обумовлена як їх суто науковою цінністю, так і великим значенням для прикладних застосувань. Тому тематика дисертації Фесенка В.І. є актуальною як в теоретичному, так і в прикладному плані і становить великий інтерес для розробників апаратури мікрохвильового, терагерцового і оптичного діапазонів хвиль.

Про актуальність і практичну значимість теми дисертації також свідчить і те, що вона виконувалася в рамках в рамках трьох держбюджетних НДР виконаних у відділі електронних НВЧ приладів Радіоастрономічного інституту НАН України та на кафедрі фізичних основ електронної техніки Харківського національного університету (в яких автор був виконавцем та керівником однієї з тем).

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

Представлені наукові положення, висновки і рекомендації, що виносяться на захист, є достатньо обґрунтованими. Постановка дослідницького завдання виконана аргументовано і переконливо. Дисертація складається із вступу, шести розділів основної частини, висновків та списку використаних джерел.

Вступ включає розгорнуту анотацію дисертації, а також приведено актуальність роботи, мету роботи, завдання і методи досліджень, наукову новизну одержаних результатів, їх практичне значення.

У першому розділі проведено огляд сучасного стану фізики багатокомпонентних композитних структур. В огляді, значну увагу приділено питанням, що стосуються механізмів керування дисперсією електромагнітних хвиль у таких середовищах. На мій погляд, проведений автором літературний огляд є досить повним і цікавим. На основі проведеного огляду автором було сформульовано мету роботи та визначено задачі які потребують розв'язку. Математична теорія та фізичні моделі обраних задач побудовані автором в подальших п'яти розділах дисертації.

Другий розділ присвячено дослідженню взаємодії електромагнітного поля з періодичними та аперіодичними шаруватими середовищами та планарними хвилеводами створеними на їх базі. Проведені дослідження спрямовані на виявлення оптимальних конфігурацій шаруватих середовищ, для досягнення найбільш ефективного керування дисперсійними характеристиками хвиль які поширюються в них. У першій частині розділу основну увагу приділено дослідженню спектральних характеристик аперіодичних шаруватих середовищ, шари яких упорядковано у відповідності до правил генерації класичної та узагальненої послідовностей Колакоскі. Слід зазначити, що використання послідовностей Колакоскі для задач пов'язаних з формуванням одномірних фотонно-кристалічних структур було запропоновано автором вперше. Отримані результати мають суттєве практичне значення та свідчать про можливість створення вискоефективних ширококугових всеспрямованих відбивачів на їх базі, які зокрема можуть слугувати в якості шаруватих оболонок планарних брегівських хвилеводів.

Далі у цьому розділі, автор зупиняється на дослідженні дисперсійних характеристик електромагнітних хвиль, які поширюються в планарному брегівському хвилеводі, та пропонує метод для ефективного керування ними заснований на спеціальному впорядкуванні шарів в оболонці хвилеводу. В результаті було отримано низку нових результатів, зокрема вперше виявлено «синій» зсув частот відсічки хвилеводних мод при використанні аперіодичних конфігурацій оболонки в порівнянні з її періодичним аналогом.

У третьому розділі досліджено особливості керування дисперсійними характеристиками об'ємних та поверхневих хвиль, які поширюються в періодичній дрібно-шаруватій структурі ферит-напівпровідник, за допомогою впливу прикладеного до структури зовнішнього статичного магнітного поля. В розділі отримано оригінальний розв'язок цієї задачі, який

задовольняється як для довільних параметрів композитної структури, так і для довільного напрямку прикладеного магнітного поля по відношенню до напрямку поширення хвиль та інтерфейсу середовищ. Детально розглянуто три окремі конфігурації намагніченості: Фарадея, Фойгта та полярна. Як свідчать результати роботи, особливий інтерес становлять геометрії Фойгта та полярна, в яких зовнішнє магнітне поле спрямовано перпендикулярно до напрямку поширення хвиль. Для таких геометрій намагніченості автором виявлено ефект співпадання регіонів існування об'ємних та поверхневих електромагнітних хвиль. Слід зазначити, що виявлений ефект є неординарним і його отримано вперше.

У **четвертому розділі** в довгохвильовому наближенні, з використанням положень теорії ефективного середовища, знайдено ефективні параметри еквівалентного гомогенізованого гіроелектромагнітного середовища та досліджено поширення і розсіяння хвиль та просторово-обмежених хвильових пучків на такому середовищі скінченої товщини при наявності в ньому матеріальних втрат. Проведені розрахунки для полів на частотах, де виконується умова «гіротропної недійсності» для компонент ефективних тензорів магнітної та діелектричної проникностей, яка відповідає ситуації коли реальні частини діагональних компонент наближаються до нуля, в той час як реальні компоненти недіагональних компонент мають ненульове значення. Цікавим результатом є ефект збереження тривимірним гаусовим пучком своїх параметрів (форми та ширини) при проходженні матеріального середовища, навіть при похилому падінні. Така фізико-математична модель необхідна наприклад для вивчення характеристик розсіяння лазерного випромінювання на композитних середовищах та має суттєве практичне значення.

Далі в розділі, автором розглянута задача про дослідження дисперсійних характеристик гібридних хвиль круглого металевого хвилеводу повністю заповненого таким дрібно-шаруватим середовищем. В результаті чого вперше визначено області існування власних хвиль такого хвилеводу, та виявлено особливості їх поширення в безпосередній близькості до частот де абсолютні значення компонент ефективних тензорів діелектричної та магнітної проникностей наближуються або до нуля або до нескінченості. Крім того визначено умови для одномодового функціонування хвилеводу з підтримкою ізольованих мод EH_{01} та HE_{11} в різних частотних діапазонах.

Метою п'ятого розділу є вивчення топологічних переходів ізочастотних поверхонь пов'язаних з хвильовою дисперсією в гіротропних середовищах. У цьому розділі побудовано фізико-математичну модель і досліджено топологічні переходи ізочастотних хвиль які поширюються в необмеженому двовісному бігіротропному середовищі, що являє собою надрешітку сформовану на базі феритових та напівпровідникових шарів, яка знаходиться під дією зовнішнього статичного магнітного поля. Матеріали для базових напівпровідникового та феритового шарів надрешітки обрано таким чином, щоб частоти їх плазмонного та феромагнітного резонансів були близько розташовані в межах одного і того діапазону частот. В результаті чого, в

обраному діапазоні частот гомогенізоване середовище являється надзвичайно анізотропним, тобто діагональні компоненти ефективних тензорів як магнітної так і діелектричної проникностей можуть відрізнятися за знаком, одне від одного, що призводить до суттєвих змін в топології ізочастотних поверхонь об'ємних хвиль які поширюються в такому середовищі. Новим результатом отриманим в роботі є виявлені топологічні переходи ізочастотних поверхонь об'ємних електромагнітних хвиль до бі-гіперболічної та тетра-гіперболічної форм. Також, автор, вперше, продемонстрував наявність топологічних переходів ізочастотних поверхонь обумовлених матеріальними втратами в шарах надрешітки. Такі топологічні переходи ізочастотних поверхонь запропоновано класифікувати як топологічні переходи індуковані втратами. Як виявлено в роботі вони відбуваються в частотних регіонах де реальна частина однієї (або двох) діагональної компоненти щонайменше одного з матеріальних тензорів наближається до нуля, в той час як її уявна частина є значною.

У заключному **шостому розділі** створено фізико-математичну модель яка описує поширення електромагнітних хвиль в напівпровідникових нанонитках з графеновим покриттям. З використанням теорії комплексних хвиль проведено повну класифікацію хвилеводних мод (спрямовані моди хвилеводу, моди випромінювання та поверхневі плазмони) та досліджено їх дисперсійні характеристики. В результаті проведених досліджень отримано низку нових результатів. Найбільш цікавим серед яких, на мій погляд, є коректне визначення частот відсічки для поверхневих плазмонів ТЕ поляризації вищого порядку.

Далі в розділі сформульовано та розв'язано задачу розсіяння лінійно поляризованої хвилі як на окремій субхвильовій нанонитці покритій однорідним шаром графену так і на субхвильових кластерах таких нанониток. Розв'язок задачі отримано з використанням положень теорії Мі та формалізму розсіяння електромагнітних хвиль на системах паралельних діелектричних циліндрів узагальнених на випадок наявності графенового покриття на їх поверхнях. Досліджено спектри розсіяння кластерів які складаються з двох та трьох нанониток (тример). Основну увагу приділено аналізу особливостей розсіяння на кластерах лінійно поляризованої хвилі TE_z поляризації. Це обумовлено збудженням поверхневих плазмонів на графеновому покритті, що не спостерігається для випадку падаючої хвилі з TM_z поляризацією. В результаті проведених досліджень отримано ряд нових практично значимих результатів. Зокрема продемонстровано, що спектр розсіяння симетричного тримеру не залежить від його просторової орієнтації по відношенню до напрямку падіння хвилі й характеризується наявністю декількох областей невидимості, обумовлених зв'язком між плазмонними модами окремих нанониток.

Новим результатом є поява додаткових областей невидимості в спектрі розсіяння несиметричного тримеру, обумовлена збудженням так званих «темних мод». Цей результат має прикладне значення для задач оптичного маскування нанорозмірних об'єктів.

3. Наукова новизна та достовірність отриманих результатів.

Наукова новизна отриманих у дисертації результатів природно впливає з актуальності й новизни вибору об'єкта досліджень, а фізично обґрунтований підхід до вибору і рішення необхідних для його повного вивчення завдань дозволяє автору переконливо це підтвердити.

В результаті проведених досліджень отримано ряд нових і принципово важливих результатів. Серед них необхідно визначити наступні:

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.

2. Створено загальну теорію та отримано 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.

3. Створено та досліджено фізико-математичні моделі які описують розсіяння електромагнітних хвиль на метаматеріалах, 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.

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.

Достовірність отриманих в дисертації результатів забезпечується використанням загальноприйнятих моделей сучасної радіофізики та математичної фізики, строгими математичними перетвореннями відповідних рівнянь, порівнянням результатів числових експериментів з результатами інших методів, чітким фізичним аналізом результатів, що виявляє механізми досліджуваних процесів. Комп'ютерні розрахунки проводились чисельними стійкими методами, для яких розроблені відповідні програми. Достовірність отриманих результатів підтверджується також їх несуперечністю при зведенні до окремих випадків.

Ознакою наукової новизни та достовірності отриманих результатів є також те, що більшість результатів опубліковано в провідних міжнародних журналах, в яких всі статті проходять ретельне експертне рецензування.

4. Завершеність і стиль викладу, повнота відображення результатів в публікаціях.

Дисертаційна робота Фесенка В.І. є завершеним науковим дослідженням, виконаним на високому науковому рівні.

В ній викладені нові фізичні результати, що мають як самостійне, так і прикладне значення, оскільки ці результати в достатній мірі сприяють вирішенню важливої наукової проблеми яка стосується аналізу і синтезу штучних композитних матеріалів і теоретичного й експериментального дослідження їх електродинамічних властивостей.

Дисертація написана цілком зрозуміло і грамотно, науково-технічна термінологія використовується коректно, структура роботи є логічною.

Наукові результати, представлені в дисертації, опубліковані в 21 статті у профільних наукових журналах, з них 2 статті опубліковано в фахових журналах України та 19 статей в зарубіжних журналах, у тому числі: 6 статей в журналах першого квартилю (Q1), 5 статей в журналах другого квартилю (Q2) та 5 статей в журналах третього квартилю (Q3), 4 розділах у книгах зарубіжних видавництв. Отримано патент України на винахід. Результати роботи пройшли апробацію на 21 міжнародних конференціях. Результати роботи повністю відображені в зазначених публікаціях. Опубліковані статті за своїм змістом не дублюють одна одну. Всі опубліковані наукові праці відповідають темі дисертації. Зміст автореферату відповідає тексту дисертації.

5. Науково-практична значимість отриманих результатів і можливі шляхи їхнього застосування

Науковий вклад дисертації складається з того, що автором були запропоновані та досліджені фізико-математичні моделі взаємодії електромагнітного поля з просторово неоднорідними штучними композитними структурами, які включають до свого складу оптично-активні елементи. На мій погляд, результати роботи мають суттєве значення для поглиблення фундаментальних знань про особливості розсіяння та поширення електромагнітних хвиль у штучних багатокомпонентних композитних матеріалах.

Практичне значення дисертаційної роботи обумовлено тим, що отримані в ній результати мають значний потенціал для широкого кола практичних застосувань. Зокрема, результати роботи можуть бути використані для створення нових високоефективних пристроїв фотоніки, мікроелектроніки, оптоелектроніки та плазмоніки.

Запропонована теоретична модель може бути використана для проектування інтегрально-оптичних і волоконно-оптичних пристроїв, які включають до своєї конструкції періодичні й аперіодичні шаруваті середовища, з метою отримання бажаних дисперсійних, спектральних і поляризаційних характеристик. Зокрема, це може бути використано для компресії та перетворення форми ультракоротких імпульсів, селекції мод, адаптивної компенсації дисперсії, частотної та поляризаційної фільтрації.

Отримані результати мають суттєве прикладне значення, та можуть бути використані при проектуванні низки пристроїв оптоелектроніки та плазмоніки, зокрема, фільтрів, ізоляторів та перемикачів. У таких пристроях, можливе динамічне керування їх спектральними та дисперсійними характеристиками, шляхом зміни величини та напрямку поля підмагнічування.

Отримані унікальні 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.

Дисертаційна робота представляє наукову і практичну цінність для фахівців в області обчислювальної електродинаміки, квантової радіофізики, оптоелектроніки та ін. Результати, отримані при її виконанні, можна рекомендувати для застосування в різних установах як дослідницького, так і науково-виробничого напрямків.

6. Недоліки і зауваження

Поряд з високим рівнем проведених теоретичних досліджень та цінністю отриманих результатів, мушу зазначити деякі недоліки і зауваження щодо дисертаційної роботи, що розглядається:

1. При розгляді дисперсії електромагнітних хвиль у періодичних та аперіодичних планарних брегівських структурах, з точки зору практичних застосувань, було б доцільно провести вивчення особливостей поширення оптичних імпульсів в аперіодичних брегівських хвилеводах.

2. При вивченні дисперсії об'ємних і поверхневих електромагнітних хвиль в композитних магнітно-напівпровідникових надрешітках в розділі 3 показано, що області існування поверхневих та об'ємних хвиль перекриваються. Через це важливим є аналіз умов стійкості поширення поверхневих хвиль. Це питання автор не ставить в дисертації.

3. У четвертому розділі детально проаналізовані дисперсійні характеристики гібридних хвиль круглого металевого хвилеводу заповненого поздовжньо намагніченим дрібно-шаруватим середовищем ферит напівпровідник в діапазоні частот який включає характеристичні резонансні частоти як магнітної так і напівпровідникової підсистем. В той же час, для повноти викладення, було б слід розглянути ефект Фарадея в такій системі.

4. У шостому розділі характеристики розсіяння електромагнітних хвиль на напівпровідникових нанонитках покритих графеном розглянуті в діапазоні довжин хвиль від 25 до 60 мкм. В той же час, цікавим є частотний регіон навколо довжини хвилі 20 мкм, де реальна частина діелектричної проникності SiO_2 приймає від'ємне значення, який виключений з розгляду.

5. Не завжди зрозуміла аргументація при виборі чисельних значень фізичних параметрів при знаходженні кількісних характеристик досліджуваних закономірностей.

7. Загальні висновки

Ці зауваження не зменшують загальну позитивну оцінку рецензованої роботи і не стосуються принципових результатів і висновків дисертації. Деталізований аналіз дозволяє зробити висновок, що представлена до захисту робота є завершеним дослідженням.

В роботі отримані нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності вирішують актуальну наукову проблему сучасної радіофізики яка стосується аналізу і синтезу штучних композитних матеріалів і теоретичного й експериментального дослідження їх електродинамічних властивостей.

За тематикою проведених досліджень, змістом і наслідками дисертація Фесенка В.І. повністю відповідає спеціальності 01.04.03 – радіофізика. Матеріали дисертації повністю опубліковані в реферованих провідних наукових журналах і були своєчасно представлені на конференціях і симпозіумах, що проводилися за тематикою досліджень.

Автореферат повністю відповідає змісту дисертації. Виклад матеріалу в дисертації відповідає сучасним вимогам, вона написана чітко, хорошою науково-літературною мовою.

Беручи до уваги усе вищесказане, вважаю, що дисертаційна робота “Електромагнітні хвилі у багатокомпонентних штучних композитних матеріалах” задовольняє усім вимогам, зазначених у п. 9, п. 10, п. 12, п. 13 „Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 656 від 19.08.2015 р., № 1159 від 30.12.2015 р.), які висуваються до докторських дисертацій, а її автор, Фесенко Володимир Іванович, безумовно заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри квантової радіофізики
факультету радіофізики, біомедичної
електроніки та комп'ютерних систем
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна, доктор фізико-
математичних наук, професор

В.О. Маслов

14 квітня 2021 року

Підпис засвідчую

Начальник Служби управління персоналом
доктор пед. наук, професор

Відрук оформлено 15 квітня 2021 р
вчений секретар спецради



С.М. Куліш