

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Ячина Володимира Васильовича “Розсіяння електромагнітних хвиль на тривимірних двоперіодичних багатошарових магнітодіелектричних структурах”, яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Актуальність обраної теми.

Макроскопічні оптичні властивості звичайних матеріалів, які обумовлені їх хімічним складом, не завжди задовольняють бажані потреби, що виникають при їх застосуванні. Розширення таких властивостей може бути запроваджено за рахунок використання метаматеріалів. Метаматеріали, як і їх двовимірні двійники - метаповерхні, є штучні середовища, ефективні властивості яких забезпечуються резонансами субхвильових будівельних блоків, їх розмірами і формами, їх нелокальним розташуванням. В останні роки демонструється багато метаматеріалів для створення нових форм лінійного оптичного відгуку, який не може бути забезпечений натуральним матеріалом. Діапазон хвиль таких демонстрацій простягається від терагерц до субміліметрів, високий потенціал їх застосування - від органів безпеки до всепогодної навігації і біомедицини.

Починаючи з дифракційних решіток інтерес до штучно створених періодичних систем і структур демонструються по всьому електромагнітному спектру. Здатність метаматеріалів забезпечити частотно-диспергуючу реакцію для вузько смугових або гіперспектральних зображень давно використовується для захвату і каналізації електромагнітних хвиль з низькими втратами. Експлуатація витікаючих мод для ефективного захвату та дисипації електромагнітної енергії в широкому діапазоні хвиль дає змогу розвитку нових елементів на динамічних метаматеріальних поглиначах, що в комбінації з електрооптичним стимулюванням дозволяє будувати просторові світлові модулятори в терагерцевому діапазоні.

Фотонні кристали є періодично розташовані на масштабі довжини хвилі діелектричні матеріали з високо контрастним показником заломлення. Розподілене Бреггівське відбиття в структурі створює фотонні смуги, які забороняють розповсюдження електромагнітних хвиль певної частоти в певному напрямку. Такі смуги можуть бути використані для створення хвилеводів і високо добротних резонаторів.

Фотонні кристали давно використовуються для захвату і каналізації електромагнітних хвиль з низькими втратами, що має численні потенціальні застосування. Багатообіцяючим до цього є використання метаповерхонь, які дають додаткову степінь свободи для конструювання електромагнітних властивостей матеріалу. Це обумовлює колосальний інтерес дослідників до метаповерхонь в останнє десятиліття. Розроблюються напівпровідникові фотонні кристали, які ефективно захоплюють і поглинають терагерцеві хвилі. Маючи порівняно просту періодичну структуру такі фотонні кристали дають максимум поглинання хвиль.

Метаповерхні є двовимірні структури субхвильових розсіювачів, які контролюють розповсюдження оптичних хвиль. Каскадні метаповерхні забезпечують нову оптичну базу з функціональністю, якої немає у одиничної метаповерхні. Метаповерхневі рефлектори демонструють потенціальні можливості для виготовлення нових високо добротних компонентів, що дає змогу конструюванню мало вагових пасивних оптичних передавачів..

Демонстрація штучного полімерного матеріалу, який випромінює світло, коли знаходиться в магнітному полі, дає можливість побудови нового типу сенсорів, які не потребують електроенергії і можуть забезпечити візуальний відгук. Розповсюдження хвиль в неоднорідному середовищі, завжди супроводжується частковим відбиванням, що часто є небажаним з практичної точки зору. Тому важливим є пошук неоднорідних анізотропних матеріалів, які взагалі не відбивають випромінювання. Багатообіцяючим в

цьому напрямку є конструювання метаматеріалу з широким спектром можливостей, коли він може бути побудований за допомогою спеціально розроблених елементів.

Таким чином, дослідження метаматеріалів на базі періодичних структур є **актуальним напрямком** розвитку електромагнетизму, що потребує створення відповідного математичного апарату, його застосування до розв'язування відповідних задач і аналізу одержаних результатів. **Актуальність** досліджень, представлених у дисертації, визначається також тим, що вони проводилось протягом 1997-2017 років у рамках кількох великих держбюджетних дослідницьких тем та міжнародних проектів, що виконувались в Радіоастрономічному інституті та в Інституті радіофізики і Електроніки Національної академії наук України, і в яких Ячин В.В. був безпосереднім відповідальним виконавцем.

Характеристика роботи та новизна отриманих результатів. Дисертація складається зі вступу та п'яти розділів.

У першому розділі «Огляд літератури» наведено хронологічний огляд літератури за темою дисертації. Показано історичний шлях розвитку досліджень періодичних та штучних структур від Фраунгофера до Веселаго, від простих дифракційних решіток до сучасних метаматеріалів, обговорюється розвиток методів розв'язання відповідних електродинамічних задач і дослідження електромагнітного поля в складних структурах. Визначається проблематика дослідження, окреслюється коло задач, що підлягають дослідженню. Окремо висвітлюється історія розвитку інтегральних рівнянь в задачах макроскопічної електродинаміки, методів їх розв'язання. Формулюється мета і задачі дослідження.

Другий розділ «Розсіяння ЕМ хвиль на двоперіодичному магніто-діелектричному шарі. Багатомодовий розв'язок» є базовим для всієї роботи. В ньому формулюється постановка електродинамічної задачі, окреслюється форма базової структури, що буде розглядатися, формулюється система інтегральних рівнянь для електричного і магнітного полів. Ця система базується на ідеях, запропонованих ще на початку 20 століття і потім в значній мірі розвинутих в школі проф. М. А. Хижняка. Принципово новий внесок дисертанта є в формулюванні тривимірних розв'язків інтегральних рівнянь у виді розкладень поляризаційних струмів за тривимірними інтегральними функціоналами на основі теореми Флоке. Застосування теореми Гальоркіна дає систему звичайних диференціальних рівнянь для цих функціоналів, які залежать тільки від однієї змінної. Знайдені внутрішні поля дозволяють знайти зовнішні поля, використовуючи ті ж самі інтегральні співвідношення. Побудована чисельна схема розрахунку полів. Застосування її дозволило провести дослідження резонансних явищ в тривимірній двоперіодичній тонкій решітці з діелектричних паралелепіпедів.

Продемонстровано Фано-резонанс на тривимірній нескінченній двоперіодичній решітці з тонких діелектричних паралелепіпедів. Показана реалізація в такій лінійній задачі явища електромагнітно-індукованої прозорості (ЕІТ), що безумовно є самим цікавим результатом цього розділу. Запропоновано і досліджено новий клас частотно селективних поверхонь, що представляють собою періодично перфоровані ідеально провідні екрани з отворами у виді гамадіонів. Показано, що добротність таких фільтрів регулюється зміною товщини екрану. Проаналізовано також новий клас смугових чутливих до поляризації фільтрів на основі ідеально провідних екранів періодично перфорованих С-образних отворами з таким же регулюванням добротності. Вперше одержано і досліджено в залежності від конфігурації періоду структури електромагнітно індуковану прозорість (ЕІТ) на двоперіодичній повністю діелектричній. Показані Фано резонанси в тривимірній двоперіодичній решітці діелектричних паралелепіпедів. Вперше для ТГц діапазону хвиль теоретично розроблені і експериментально продемонстровані диференціальні фазові секції на основі періодичної решітки, яка складається з діелектриків слюда-лавсан і полістирол-повітря.

Таким чином, в цьому розділі розвинуто новий метод розв'язування тривимірних векторних електромагнітних задач розсіювання електромагнітних плоских хвиль на двоперіодичному магніто-діелектричному шарі в багатомодовому режимі на основі об'ємних інтегральних рівнянь макроскопічної електродинаміки. Доведена однозначність розв'язку, показана достовірність числових розрахунків.

Третій розділ «Розсіювання плоских ЕМ хвиль на багатошарових двоперіодичних магніто-діелектричних структурах. Багатомодовий розв'язок», в якому розглядаються багатошарові структури є дуже багатий на результати. В дисертації побудовано ефективні рекурсивні схеми для знаходження коефіцієнтів проходження і відбиття плоскої електромагнітної хвилі для багатошарової структури. Задача зводиться до СЛАР з квадратною блочно-діагональною матрицею. Розглянуто тришарову металеву пластину, перфоровану круглими отворами. Показано, що товщина середньої пластини дозволяє зсувати резонанс і регулювати ефективність передачі електромагнітної хвилі. Розглянуті можливості механічного регулювання фільтрів, сенсорів і других нанофотонних пристроїв за допомогою двошарових схрещених решіток, утворених з паралельних брусів прямокутного перерізу. Проведені теоретичні розрахунки резонансів показує добре узгодження з результатами проведених експериментів. Продемонстрована висока міра (добротність резонансу 40) механічної перебудови резонансного відгуку в надширокому діапазоні частот.

Досліджені кіральні анізотропні структури, що має важливе значення при відсутності в діапазоні терагерцевих частот природних магнітних матеріалів для ефективного обертання площини поляризації поля. Для цього розглянуті металеві квадратні спіралі, вбудовані в діелектричний шар. Продемонстровано майже повне перетворення поляризації поля при проходженні через решітку півтора крокових спіралей.

В цьому розділі також розглянуто композитні матеріали, армовані вуглецевими волокнами, які все більше використовуються, наприклад, в аерокосмічній техніці. Такі матеріали моделюються багатошаровою (до 48 шарів) структурою у вигляді тонких щільно укладених шарів вуглецевих волокон, занурених в епоксидну матрицю. Досліджено вплив термічної деградації матеріалу на резонансні властивості матеріалу.

В четвертому розділі «Розсіювання ЕМ хвиль на двоперіодичному гіротропному шарі. Багатомодовий розв'язок» розглянуто резонансні явища гіромагнітних шарів, матеріал яких описується тензорами магнітної і діелектричної проникностей. Визначені умови реалізації поляризаційно-селективних функцій гіротропного шару, а також його залежності від степені перфорації шару. Показана можливість посилення магнітооптичних ефектів, таких як, наприклад, ефект Фарадея, за рахунок використання резонансної взаємодії в періодично структурованих розсіювачах з гіротропних матеріалів.

Вперше методом інтегральних функціоналів розв'язана векторна задача дифракції плоскої електромагнітної хвилі на двоперіодичному гіротропному шарі і вперше розглянуто застосування такого шару в якості поляризатора Брюстера. Запропоновані нові методики для ефективного пошуку параметрів поляризатора для його оптимальної реалізації для ТМ і ТЕ хвиль. Вперше продемонстровано явище екстраординарного збільшення обертання Фарадея при використанні структур з перфорованих провідників, отвори в яких заповнені залізо-ітрієвим гранатом. Резонанс відбувається на ґратових модах і відноситься до резонансів магнітного типу.

П'ятий розділ «Розсіювання ЕМ пучків на двоперіодичному магніто-діелектричному шарі» кардинально відрізняється я від попередніх значно складнішим первинним полем, яке тепер становить собою тривимірний пучок Гауса з круговою симетрією розподілу поля. Такий пучок може бути хорошою апроксимацією розподілу поля для моди HE_{11} в порожнистому діелектричному хвилеводі, які застосовуються в діапазонах довжин хвиль від міліметрового до інфрачервоного. Тоді плоско-шаруваті магнітодіелектричні періодичні структури можуть використовуватись для керування характеристиками високочастотного поля в квазіоптичних лініях передачі.

Вперше виявлено явище, коли при падінні гаусівського пучка під кутом на перфорований шар максимума перпендикулярних компонент пучка можуть зсуватись в протилежних напрямках. Вперше виявлено, що при певних товщина шару фериту спостерігається повне проходження пучка без зміни його форми в широкому діапазоні кутів його падіння.

Обґрунтованість і достовірність результатів дисертації. Обґрунтованість і достовірність отриманих в дисертації результатів підтверджуються строгим формулюванням задач, вибором строгих методів розв'язання, що базуються на теорії інтегральних рівнянь, порівнянням результатів числових експериментів з результатами інших методів, чітким фізичним аналізом результатів, що показує добре розуміння автором механізмів досліджуваних процесів.

Науково-практичне значення результатів дисертації

У дисертаційній роботі досліджені практично важливі задачі про розсіяння електромагнітного випромінювання на тривимірних багатошарових металомагнітодіелектричних двоперіодичних структурах, які моделюють метаматеріали та метаповерхні. Такі структури широко використовуються в приладобудуванні в частотних діапазонах хвиль від мікрохвильового до оптичного для створення різного роду смугових фільтрів, дільників пучка і диплексерів для квазіоптичних і мікрохвильових пристроїв, а також для створення слабо відбиваючих і поглинаючих покриттів. Багатошарові періодичні структури можуть служити складовими елементами трансформаторів поляризації, поляризаторів електромагнітного випромінювання, сенсорів і т. ін. Вони можуть бути використані як поляризаційні селективні невзаємні екрани та як дільники променя. В області інтегральної оптики ці структури можуть використовуватись для створення різних затворів і модуляторів, керованих зовнішнім електричним або магнітним полем. Метаматеріали з механічним настроюванням елементарної комірки можуть бути ефективними для керування характеристиками ЕМ хвиль. При цьому частота резонансу може бути змінена в широких межах, в тому числі і ТГц діапазоні, який залишається слабо забезпеченим системами регулювання діапазоном. В дисертації запропоновано, розроблено і досліджено чвертьхвильові і напівхвильові широкосмугові диференціальні фазові секції хвилеводних трактів для перетворення поляризації в ТГц частотному діапазоні.

Модель вуглепластика, що являє собою періодично укладені вуглецеві волокна в епоксидній матриці, дозволила ефективно досліджувати електродинамічні процеси розсіяння для різних сценаріїв опромінення і температурного режиму, вивчати фізичні явища у вуглепластику, визначати безконтактним способом його стан і деградацію матеріалу. Цей підхід має велике значення у виробництві і експлуатації матеріалів для сучасних літальних апаратів.

Ще одним практично важливим об'єктом досліджень цієї дисертаційної роботи є магніто-фотонний кристал - двоперіодична структура з гіротропного матеріалу. Посилення магнітооптичних ефектів на базі різних видів резонансів відіграють важливу роль в техніці НВЧ. Особлива роль відводиться ефекту Фарадея, завдяки якому істотне збільшенню кута обертання Фарадея в двоперіодичній структурі дає можливість мініатюризувати такі, наприклад, прилади як модулятори та затвори. Крім того, передбачений ефект може бути використано для створення нових планарних елементів інтегральної оптики, а також може бути застосований в 3D дисплеях і телекомунікаційних приладах.

Повнота висвітлення матеріалів дисертації в опублікованих працях. Наукові положення, висновки та рекомендації дисертації, достатньо повно викладені у 32 статтях у фахових наукових журналах (з них 16 опубліковано у реферованих закордонних журналах, та в 1 розділі монографії) та у 12 публікаціях у реферованих збірках праць наукових конференцій, які всі є міжнародними. Зміст **автореферату** є ідентичним положенням дисертації й дозволяє судити про обсяг і якість виконаної дисертантом

роботи. В авторефераті не міститься відомостей, які не представлено в дисертації. Результати наукових досліджень, за якими здобувач захистив **кандидатську дисертацію**, не ввійшли до положень, що виносяться на захист. Новизна результатів у сумісних роботах висвітлена усюди по тексту дисертації, де вони представлені.

Зауваження по дисертації. Робота не позбавлена деяких недоліків:

1. Не зовсім вдалим є зауваження про неперервність (континуальність) електромагнітного поля при переході від однієї точки простору до другої як наслідок його опису диференціальними рівняннями в часткових похідних (2.1.1)-(2.1.4) в вакуумі.
2. Визначення діелектричної проникності в рівняннях (2.1.24)-(2.1.27) виглядає не зовсім коректним, бо вони контрастують з рівняннями для поля (2.1.32)-(2.1.35) в неоднорідному середовищі, але про це нічого не говориться.
3. Незрозумілі повтори – матеріальні рівняння (2.30) записані і в компонентах, і ті ж самі рівняння (2.1.31) в векторній формі.
4. Застосовується невизначений символ k .
5. Неясно показана замкненість системи рівнянь для поля при введенні інтегральних функціоналів в розділі 2.3: різний запис однієї і тої ж формули (2.3.3) і (2.3.4); некоректне посилання на (2.1.41) і (2.1.42), тоді, як треба на (2.1.43).
6. Не зовсім вдалим є формулювання на стор. 53 «можна назвати гіроелектричні середовища, та гіромагнітні середовища». Так можна назвати, чи вони таким і є?
7. Взагалі, може було б доцільніше розділи 2.3 і 2.4 поміняти місцями.
8. В формулюванні концепції об'ємних інтегральних рівнянь, стор. 53, слід було б зауважити, що вона була спочатку сформульована М. Борном і Е. Вольфом, а саме в такому виді, як в даній дисертації, М.А. Хижняком.
9. Пропущений множник $i\omega/4\pi$ в формулі (2.3.1) порушує співвідношення розмірності струму і поля.
10. Не зовсім вдалими є деякі роз'яснення до формул. Наприклад, до формули (2.3.4): « $\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}')$ позначає дельта-функцію», тоді як це і є стандартне позначення для узагальненої функції, яке використовується як у фізичних, так і в математичних текстах. На стор. 66 використання жаргону «дельта Кронекера», хоча в літературі таким чином вживати цей термін не прийнято.
11. Слід було б наголосити на стор. 61, що вводиться косоугольна система координат.
12. Різні позначення для векторів – до стор. 72 жирним шрифтом, а потім стрілкою.
13. Не зовсім справедливе зауваження на стор. 73 про недостатню обґрунтованість методу інтегральних рівнянь – в роботі Хижняка наведено строгий доказ еквівалентності інтегральних рівнянь крайовій задачі на базі рівнянь Максвела.
14. Серед технічних зауважень слід зазначити досить велику кількість орфографічних описок (наприклад, часто відсутні коми в складно-підрядних реченнях).

В цілому ж наведені зауваження не знижують якості роботи і не торкаються її принципових положень і висновків. В ній проведено детальний аналіз нових явищ і одержані важливі фізичні теоретичні результати, які з успіхом знайдуть застосування на практиці.

Загальний висновок. Дисертаційна робота Ячина В.В. «Розсіяння електромагнітних хвиль на тривимірних двоперіодичних багатошарових магнітодіелектричних структурах», що подана на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук, вирішує важливу наукову проблему та розвиває новий науковий напрямок дослідження метаматеріалів у вигляді тривимірних двоперіодичних багатошарових магнітодіелектричних структур шляхом застосування розробленого ефективного методу на базі інтегральних рівнянь макроскопічної електродинаміки, еквівалентних рівнянням Максвелла. Розроблені методи та числові схеми розв'язання застосовано до аналізу цілої низки важливих електродинамічних задач, що дозволило дослідити нові фізичні явища та виявити нові фізичні ефекти. Достовірність отриманих результатів не підлягає сумніву. За тематикою проведених досліджень, змістом та отриманими результатами дисертація Ячина В. В. цілком відповідає паспорту спеціальності 01.04.03 – радіофізика. За рівнем, отриманими результатами, змістом, обсягом і оформленням дисертаційна робота задовольняє всім вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.13 року № 567, що пред'являються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук. Її автор, Ячин Володимир Васильович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика..

Офіційний опонент,
завідуючий кафедрою вищої математики
Харківського національного
університету радіоелектроніки,
доктор фізико-математичних наук, професор

Нерух О. Г.

Підпис Неруха Олександра Георгійовича завіряю.
Вчений секретар ХНУРЕ

Магдаліна І.В.

ПІДПИС ЗАСВІДЧУЮ:

Зает Начальник відділу кадрів
"16" _____ 04 _____ 2018 р.

