

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Бреславця Олексія Андрійовича

«Наддобротні колювання в НВЧ резонансних структурах з металевими та діелектричними неоднорідностями»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія

Актуальність дослідження

Наразі об'ємні надвисокочастотні (НВЧ) резонансні структури та резонансні метаповерхні з діелектричними та металевими неоднорідностями привертають значний науковий і практичний інтерес, як актуальні для застосування у різних технологічних напрямках, в яких застосовуються сенсори, частотні фільтри, модулятори, радары. Однією з проблем визначення спектральних характеристик, наприклад, при виконанні частотної фільтрації, є необхідність урахування умов виникнення різноманітних резонансних явищ, що формують криву вікон прозорості. Як наслідок, існує потреба подальшого розвитку об'ємних НВЧ резонаторів і метаповерхонь шляхом експериментального дослідження впливу неоднорідностей на резонансні явища та виявлення закономірностей і механізмів, відповідальних за ці явища. Актуальність теми дисертаційної роботи, присвяченої вивченню резонансних явищ в об'ємних НВЧ резонаторах і метаповерхнях, обумовлена як практичним інтересом, так і важливістю з точки зору фундаментальних досліджень в галузі радіофізики та діелектрометрії. А саме, актуальність полягає в необхідності вивчення впливу неоднорідностей і спотворень форми резонансних структур, перспективних для практичного застосування, на їхні спектральні характеристики та встановленні основних механізмів, відповідальних за ці фізичні процеси.

Метою дисертаційної роботи є вивчення резонансних явищ в об'ємних НВЧ структурах і в резонансних метаповерхнях з діелектричними та металевими неоднорідностями. Для досягнення мети було виконано наступні завдання: дослідження електромагнітних колювань у НВЧ резонаторах для задачі вимірювання діелектричної проникності твердотільних зразків у широкому діапазоні діелектричної проникності аж до 20 одиниць з надмалим тангенсом кута діелектричних втрат аж до 5×10^{-6} ; дослідження електромагнітних колювань у резонаторах у формі тіл обертання довільної форми; виявлення ознак явища хвильового хаосу на прикладі закритого циліндричного НВЧ резонатора з випадковими об'ємними неоднорідностями; дослідження поширення електромагнітних

коливань в метал-діелектричній метаповерхні для визначення наявності електромагнітної індукованої прозорості.

Ступінь наукової обґрунтованості та наукова новизна результатів роботи

Достовірність отриманих у роботі експериментальних результатів підтверджується використанням апробованих методів і методик досліджень та відповідного сучасного експериментального обладнання, використанням калібрувальних зразків в експериментах, порівняльним аналізом з даними, отриманими науковими групами, а також публікаціями в рейтингових фахових журналах, які входять до міжнародних наукометричних баз.

Наукова новизна дисертаційної роботи Бреславця О.А. визначається наступним:

1. Вперше розраховано параметри відкритих сферичних резонаторів для визначення діелектричної проникності у широкому діапазоні аж до 20 з надмалим тангенсом кута діелектричних втрат аж до 5×10^{-6} твердих зразків при оптимальних розмірах відкритого резонатора у Х-діапазоні та мінімальних розмірах у L-діапазоні. Також були визначені оптимальні розміри закритого циліндричного резонатора на робочій моді TM_{001} .
2. Вперше визначено алгоритм вимірювання діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат твердого зразка невідомого матеріалу у відкритому сферичному та закритому циліндричному резонаторах на основі передбачуваних калібрувальних характеристик резонансної частоти робочої моди та добротності резонатора. Показано, що алгоритм дає оцінку похиби вимірювання менш ніж 10% і 20% для діелектричної проникності й тангенса кута діелектричних втрат, відповідно.
3. Розраховано частотний спектр у резонансних структурах з довільною формою тіл обертання з довільно розташованим сферичним включенням за допомогою методу граничних умов у локальних точках. Отримано гарне співпадіння результатів розрахунку власних частот за допомогою цього методу та за допомогою комп'ютерного моделювання методом кінцевих елементів.
4. В закритому циліндричному резонаторі, якщо стрижні розташовано асиметрично відносно центральної осі, розраховано та експериментально підтверджено наявність ознак хвильового хаосу (розподіл імовірності міжчастотних інтервалів наближається до розподілу Броді, що в границі є розподілом Вігнера). Якщо стрижні відсутні або розташовані симетрично відносно центральної осі симетрії, підтверджено відсутність ознак хвильового хаосу (розподіл імовірності наближається до розподілу Пуассона).
5. Реалізовано резонансну метал-діелектричну метаповерхню, в якій отримано й експериментально підтверджено високі значення затримки часу і чотири смуги електромагнітної індукованої прозорості.

Список публікацій здобувача

Результати дисертації викладено в 4 статтях, які опубліковано в фахових виданнях, що входять до наукометричних міжнародних баз Scopus, Web of Science і Google Scholar, та 13 тезах доповідей у збірниках праць міжнародних і вітчизняних конференцій.

Структура дисертаційної роботи

Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 189 сторінок, з яких 149 сторінок основного тексту, включаючи 69 рисунків і 22 таблиці. Робота складається з анотації, вступу, п'ятих розділів, висновків, списку використаних джерел і одного додатка.

В *першому розділі* проведено аналіз загальних особливостей, переваг і недоліків об'ємних НВЧ резонансних структур і резонансних метаповерхонь з точки зору їхнього практичного застосування на основі огляду попередніх наукових робіт. Визначено, що великий інтерес представляє задача вимірювання діелектричної проникності в максимально широкому діапазоні з надмалим тангенсом кута діелектричних втрат твердих діелектриків за допомогою об'ємних резонаторів з максимально ефективно розрахованих і виготовлених частин цих резонаторів. Визначено, що основна необхідність розробок в області існуючих методів розрахунку власних частот резонансних структур у формі тіл обертання продиктована тим, що відомі рішення обмежено тільки малими відхиленнями від сферичної форми (еліпсоїди) та малими неоднорідностями. Визначено, що основними недоліками існуючих досліджень ознак наявності явища хвильового хаосу в закритих резонансних структурах є використання переважно двовимірних теоретичних моделей і методик аналізу явища за допомогою променів. Визначено, що при проектуванні метал-діелектричних метаповерхонь для задач отримання вікон електромагнітної індукованої прозорості виникають проблеми при переході на більш високі частоти, що пов'язано з необхідністю застосування підвищених вимог до точності виготовлення розмірів частин метаповерхні та втрати в металі, що збільшуються. Також виявлено обмеженість у досягнутих кількості смуг пропускання та значенні групової затримки.

В *другому розділі* дисертації визначено схему компактного відкритого сферичного та закритого циліндричного НВЧ резонаторів для отримання спектральних характеристик, оптимальних для вимірювання діелектричної проникності твердотільних зразків мінімальних розмірів у широкому діапазоні діелектричної проникності (від 1 до 20 одиниць) з надмалим тангенсом кута діелектричних втрат (до 5×10^{-6}), а також у широкому діапазоні напруги електричного поля в центрі резонатора. Також запропоновано методики вимірювання діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат.

У *третьому розділі* дисертації викладено аналіз результатів розрахунку власних частот закритих НВЧ резонаторів у формі тіл обертання зі сферичним діелектричним включенням методом граничних умов у окремих точках на границі розділу середовищ, а його результат підтверджено за допомогою методів збурення форми та сфероїдальної власної частоти. Також проведено дослідження залежності точності від кількості мод, що беруть участь у розкладанні, залежності точності від кількості точок на границі розділу середовищ, впливу флуктуацій форми, обчислювальної ефективності та стабільності.

У *четвертому розділі* дисертації визначено вплив випадкових металевих штирових неоднорідностей на розподілення імовірності міжчастотних інтервалів частотного спектра закритого циліндричного НВЧ резонатора бильярдного типу.

У *п'ятому розділі* дисертації розроблено резонансну метал-діелектричну метаповерхню для отримання високих значень затримки часу проходження електромагнітної хвилі та добутку групової затримки на пропускну здатність, кількості смуг пропускання. Підтверджено можливість керування вікнами прозорості за допомогою розмірів.

Кожен розділ дисертації включає в себе висновки. Основні висновки дисертації наведено наприкінці роботи. В основних висновках сформульовано та обґрунтовано отримані автором результати, узагальнення та положення всіх розділів роботи.

Практичне значення наукових результатів

Отримані результати, а саме розроблений алгоритм визначення діелектричної проникності та надмалого тангенса кута діелектричних втрат твердих діелектриків, може бути використано при проектуванні мікрохвильових пристроїв, розроблена методика граничних умов у локальних точках для визначення частотного спектра в резонансних структурах у формі тіл обертання може бути використаною в засобах телекомунікації, визначені умови появи хвильового хаосу в резонаторах з випадковими неоднорідностями може бути використано у сферах бездротового зв'язку та локалізації, розроблена метаповерхня також може бути використаною в засобах і елементах телекомунікації.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. У четвертому розділі не було вказано межі похибки експериментальних вимірювань спектра.
2. У п'ятому розділі бажано було б якби автор показав, як можна керувати параметрами смуг прозорості за допомогою засобів зовнішнього впливу.
3. Також у п'ятому розділі відсутня конкретна пропозиція застосування запропонованої мета-поверхні в конкретному приладі.

Однак, вказані недоліки не стосуються принципових висновків і положень і не знижують наукову та практичну значущість викладених в роботі результатів.

Відомості про дотримання академічної доброчесності

Представлені в дисертації Бреславця О. А. результати не порушують правил академічної доброчесності. Наведені в роботі результати інших авторів мають посилання на відповідне першоджерело.

Висновок щодо відповідності дисертації нормам

Вважаю, що дисертаційна робота Бреславця О. А. «Наддобротні коливання в НВЧ резонансних структурах з металевими та діелектричними неоднорідностями» є завершеною науковою працею, яка містить низку нових, актуальних і достовірних результатів, що свідчать про її складність, систематичність і які сприятимуть вирішенню задач, пов'язаних з використанням резонансних структур, у тому числі, у бездротових технологіях передачі та обробки сигналів, методиці визначення матеріалів. Дисертація повністю відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 р., а її автор, Бреславець Олексій Андрійович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія.

Рецензент

Доктор фізико-математичних наук, старший дослідник,

старший науковий співробітник

відділу радіофізики твердого тіла

ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України



Олександр БАРАННИК

Підпис О.А. БАРАННИКА засвідчую

В.о. вченого секретаря

ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України

кандидат фіз.-мат. наук



Олена КРИВЕНКО