

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Рибіна Олега Миколайовича «Двокомпонентні метаматеріали і мікросмужкові антени на їх основі», яку представлено на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика (010 – природничі науки)

Актуальність теми. За останні 50 років у електродинаміці штучних середовищ виділився окремий напрямок досліджень, так званих, метаматеріалів. Властивості метаматеріалів відрізняються від властивостей природних речовин, але добре описуються математичними моделями на основі рівнянь Максвелла і матеріальних рівнянь, у яких діелектричні та магнітні проникності приймають значення, невластиві природним речовинам. Останнім часом знайдені шляхи створення таких штучних композитних середовищ, властивості яких визначаються, в першу чергу, їх структурою, а потім – складом.

Дисертація Рибіна О. М. присвячена: 1) дослідженню електродинамічних властивостей двокомпонентних метаматеріалів, що складаються з ізотропного діелектрика і періодичних металевих включень у вигляді циліндрів або сфер; 2) створенню концепції мініатюризації та поліпшенню характеристик мікросмужкових антен НВЧ-діапазону з підкладками на основі досліджуваних матеріалів. Об'єктом досліджень є електромагнітні процеси в двокомпонентних метало-діелектричних метаматеріалах. Дисертант досліджував метаматеріали як з немагнітними (мідними), так і феромагнітними (залізовмісними) включеннями, які частково чи повністю намагнічувалися зовнішнім магнітним полем. Цілком очевидно, що без наявності адекватних математичних моделей штучних середовищ важко провести кількісні та якісні дослідження НВЧ-пристроїв, у яких складовими частинами є ці середовища. Такі моделі дозволяють обґрунтовано вибирати робочі моди, що найбільш прийнятні для конкретних додатків, розробляти достовірні методики оптимізації пристроїв і непрямого вимірювання електрофізичних параметрів композитних матеріалів. У дисертації набрав подальшого розвитку метод теорії ефективного середовища, в якості якого використовувався двокомпонентний композитний матеріал (метаматеріал) з адекватними електрофізичними параметрами. Отримані результати дозволяють створювати альтернативні НВЧ-пристрої різноманітного призначення (наприклад, фільтри, фазообертачі, обертачі площини поляризації) на основі традиційних радіофізичних підходів.

У світлі сказаного, тема дисертаційної роботи Рибіна О. М. є актуальною як в теоретичному, так і прикладному сенсі. **Мета роботи** полягає в розробці математичних моделей розсіювання електромагнітних хвиль на плоскопаралельних штучних композитних середовищах і їх апробації в рамках теорії ефективного середовища та концепції оптимізації мікросмужкових антен. Додатковим підтвердженням актуальності теми є входження обраної тематики в наукові програми НАН України та Міністерства освіти і науки України. З матеріалів дисертації видно, що вона виконана в рамках двох держбюджетних тем, що виконуються у ХНУ імені В. Н. Каразіна, одного науково-дослідного проекту,

який реалізовано в Nagoya Institute of Technology спільно з NGK Spark Plug Co. Ltd. (Японія), і двох персональних науково-дослідницьких грантів, які були отримані дисертантом від Higher Education Commission of Pakistan і Хубейського уряду КНР.

Обґрунтованість наукових положень дисертації впливає з того, що вони базуються на результатах кількісного і якісного аналізу адекватних електродинамічних моделей хвилеводних пристроїв і резонаторів, що містять штучні композитні матеріали. Ці моделі побудовано на основі рішень рівнянь Максвелла і матеріальних рівнянь, що містять ефективні електрофізичні параметри штучних композитних середовищ.

Теоретичні дослідження базуються на теорії ефективного середовища, в основі якої лежить електродинаміка штучних середовищ. При цьому розглядаються безмежні середовища з ізотропного діелектрика, в якому містяться періодичні металеві циліндричні або сферичні неоднорідності. Експериментальні дослідження базуються на вимірюванні S-параметрів зразків зі штучних середовищ, які розташовані у мікрохвильових трактах, зокрема, мікросмужкових лініях. Штучні середовища являють собою правильні паралелепіпеди з ізотропних діелектриків з шарувато-періодичними металевими включеннями, що задовольняють умови симетрії.

Достовірність отриманих кількісних результатів і якісних висновків обумовлена обґрунтованістю теоретичних моделей досліджуваних НВЧ-трактів, що містять метаматеріальні зразки; використанням добре апробованих чисельних методів аналізу електродинамічних структур; а також добрим збігом розрахункових значень S-параметрів НВЧ-трактів з експериментально виміряними. Достовірність експериментальних результатів визначається обраними методиками вимірювань і технічними можливостями застосовуваних вимірювальних пристроїв. Доказом використання методу визначення ефективних електрофізичних параметрів штучних композитних матеріалів (метаматеріалів) з використанням мікросмужкових ліній є збіг отриманих результатів досліджень з результатами, що отримані іншими дослідниками з використанням альтернативних методів. Всі нові результати добре обґрунтовані за допомогою використання фундаментальних принципів фізики.

Наукова новизна результатів і висновків дисертації полягає в наступному:

1. Придбала подальший розвиток електродинамічна теорія штучних середовищ, які складаються з ізотропних діелектриків з періодичними феромагнітними металевими включеннями – так звана, теорія ефективного середовища. Часткове або повне намагнічування металевих включень здійснюється зовнішнім магнітним полем.

2. Встановлено, що метаматеріали з феромагнітними включеннями у вигляді циліндрів мають магнітні втрати на два (в разі повного намагнічування), а то й три (в разі часткового намагнічування) порядки менше, ніж з аналогічними включеннями у вигляді куль. Знайдено умову відсутності втрат енергії слабкого електромагнітного поля в метаматеріалах з частково намагніченими феромагнітними включеннями.

3. Уперше показано і аргументовано, що мікросмужкові антени з багат шаровими підкладками з метаматеріалів (композитів) з великими значеннями діелектричних і магнітних проникностей володіють великими значеннями коефіцієнтів посилення і корисної дії та мають менші об'ємні профілі в порівнянні з традиційними прямокутними мікросмужковими антенами.

4. Запропоновано новий підхід до вимірювань комплексних значень ефективних проникностей метаматеріалів у НВЧ-діапазоні. Підхід реалізовано на базі відкритого мікросмужкового резонатора.

Наукова і практична значущість роботи полягає в тому, що в ній на основі побудованих фізико-математичних моделей мікросмужкових трактів з метаматеріальними резонаторами розроблено комплекс методик дослідження S-параметрів резонаторних трактів і ефективних електрофізичних параметрів матеріалів, з яких виготовлені резонатори. Це розширює можливості радіофізичних методів вимірювань вказаних параметрів. Збіги теоретичних і експериментальних досліджень спектральних характеристик вивчених НВЧ-вузлів дають гарантію для реалізації результатів дисертації та застосованих методик при розробці НВЧ-пристроїв і приладів. Слід зазначити, що результати дисертації знайдуть широке впровадження при синтезі нових метаматеріалів НВЧ-діапазону, а також у розробках елементів і пристроїв НВЧ-техніки та, особливо, вузлів мікрохвильового випромінювання у вигляді мікросмужкових антен.

Серед можливих напрямів використання результатів дисертації можна назвати впровадження розвиненої теорії ефективного середовища і розроблених методик дослідження мікросмужкових трактів і антен у практику конструкторських і проектних організацій, які займаються розробкою НВЧ-апаратури різноманітного призначення.

Зауваження та недоліки. Підтверджуючи обґрунтованість висновків і отриманих результатів, по суті їх змісту, необхідно зробити такі зауваження:

1. Автор у розділі 5 стверджує, що отримані результати дозволяють використовувати магнітні метаматеріали для створення компактних бездротових систем передачі електричної енергії в НВЧ-діапазоні з високими значеннями ККД. Але, це гучне твердження не аргументовано і не обґрунтовано. Воно продиктовано тільки тим, що в таких системах використовуються антени і, отже, можуть бути застосовані метаматеріальні смужкові антени, дослідженнями яких займався дисертант, а їх результати він представив у розділі 6.

2. У висновках дисертації стверджується: «Показано, що в залежності від напрямку поширення первинної електромагнітної хвилі відносно напрямку зовнішнього намагнічування такі метаматеріали можуть бути використані при створенні альтернативних (до вже існуючих) фільтрів, конверторів фази, транспондерів і ретрансляторів електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону, а також при створенні керованих селективних метаповерхонь НВЧ-діапазону». Виникає питання: яким чином повинні бути зорієнтовані вектори напрямків поширення хвилі та магнітної індукції зовнішнього магнітного поля, щоб реалізувати на основі метаматеріала той, чи інший НВЧ-пристрій і, тим більше, керовану селективну поверхню? Ця загальна фраза, з одного боку, є багато значущою, а з іншого боку – суперечливою. Тим більше, в дисертації ніде не показано жодного

шляху створення хоча б одного з цих НВЧ-пристроїв.

3. Автореферат є, по суті, об'єднання чотирьох повторюваних частин тексту, в яких описані одні й ті ж фізичні моменти. Перша частина – це новизна результатів. Друга – опис підрозділів дисертації. Третя – висновки. Четверта – анотація. Висновки й анотація є коротким описом розділів з виділенням їх результатів. Дисертанту необхідно було представити розділи новизни і висновків у систематизованому вигляді з виділенням основних досягнень, які виносяться до захисту. Крім того, в авторефераті слабо відображено математичну сторону дослідження, яку варто було б додати, тим більше, що обсяг автореферату дозволяє це зробити.

4. Текст дисертації (автореферату) містить дуже довгі речення, що викликає труднощі розуміння суті висловлювань у читача. Автору варто було б висловлювати суть фізичних і математичних моментів більш чітко, коротко і лаконічно.

5. Робота містить недоліки друкування та описки.

Разом з тим, зазначені зауваження принципово не порушують суть роботи, не впливають істотно на кінцеві результати досліджень, що виконані автором, не зменшують наукове значення та актуальність дисертації, не знижують високу оцінку наукового рівня дисертаційної роботи. Зауваження 3 і 4 є рекомендацією автору викладати свої результати більш чітко і аргументовано. Зауваження 1 і 2, які є принципові в частині вирішення глобальних проблем, не позначаються на достовірності отриманих результатів з удосконалення НВЧ-пристроїв і методів дослідження електрофізичних параметрів штучних середовищ. В цілому, висловлені зауваження та зазначені недоліки не знижують загальну позитивну оцінку роботи.

Загальна оцінка роботи. Переходячи до загальної оцінки дисертації, слід відмітити, що вона видається закінченим і цілісним дослідженням, з чіткою структурою та логічним поданням матеріалу, а також свідчить про персональний внесок автора в науку. Вона присвячена вирішенню актуальної проблеми радіофізики, яка пов'язана з теоретичними та експериментальними дослідженнями ізотропних діелектричних середовищ з періодичними феромагнітними включеннями циліндричних або сферичних форм, що складають основу НВЧ-фільтрів різного функціонального призначення. Результати дисертаційної роботи досить повно висвітлені в відповідних публікаціях, що включають 27 статей, які опубліковано за кордоном і в журналах, що входять до Переліку фахових видань України за спеціальністю 01.04.03, та 11 доповідей на міжнародних конференціях і симпозіумах. Аналіз публікацій автора показав, що вони мають всі необхідні елементи, що підкреслюють повноту і глибину розкриття питань, що розглядаються. Робота має широку апробацію на 10 міжнародних наукових конференціях і симпозіумах. Дисертація написана з використанням термінології, що прийнята в даній науковій галузі, досить зрозуміло і логічно. Стиль викладу матеріалу характеризується цілісністю, змістовною завершеністю, послідовністю та взаємозв'язком. Зміст і структура автореферату О. М. Рибіна в достатній мірі відповідають структурі, основним положенням і висновкам дисертації. Обсяг і оформлення дисертації відповідають існуючим вимогам.

Висновки по роботі в цілому. Дисертаційна робота О. М. Рибіна «Двокомпонентні метаматеріали і мікросмужкові антени на їх основі» є завершеною працею. Відбиті в ній науково обґрунтовані результати про властивості штучних середовищ з ізотропних діелектриків з феромагнітними металами у вигляді циліндрів або куль, що частково або повністю намагнічені, є значним досягненням у розвитку радіофізики. За своєю актуальністю, новизною, науковим і практичним значенням отриманих результатів дисертаційна робота задовольняє всім вимогам «Порядку присудження вчених ступенів», що пред'являються до дисертацій за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика (010 - природничі науки).

З урахуванням вищевикладеного вважаю, що Рибін Олег Миколайович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за вказаною спеціальністю.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук

за спеціальністю радіофізика,

старший науковий співробітник,

провідний науковий співробітник відділу "Радіофізики твердого тіла"

Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

НАН України

Ю. В. Прокопенко Ю. В. Прокопенко

Підпис Прокопенка Ю. В. засвідчую.

Учений секретар ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України,

канд. фіз.-мат. наук



І. Є. Почаніна