

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Рибіна Олега Миколайовича “Двокомпонентні метаматеріали і мікросмушкові антени на їх основі”, подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика

Актуальність теми дисертації. Дослідження ефективних властивостей електромагнітних метаматеріалів є новим важливим напрямом досліджень у радіофізиці. Термін «метаматеріал» з'явився на межі XX-XXI століть, проте за цей відносно короткий час було написано багато статей, присвячених створенню метаматеріалів, дослідженню їх властивостей і розробленню приладів на їх основі. Роботи у цьому напрямі широко ведуться і зараз, проте значна їх частина присвячена дослідженню виключно резонансних матеріалів, коли гомогенізація метаматеріалу неможлива. Проте, для створення, наприклад, широкосмугових приладів, що є альтернативними до вже існуючих, резонансні метаматеріали часто є малоприматними, оскільки потрібні штучні матеріали зі стабільними характеристиками у широкій смузі частот. Ось чому створення нових модифікацій теорії ефективного середовища для будь-яких метаматеріалів є важливою подією. Більш того, існування моделей для ефективних параметрів метаматеріалів може значно полегшити моделювання характеристик приладів. Прикладом таких комплексних досліджень є дисертація О. М. Рибіна, в якій дисертант запропонував модифікацію теорії ефективного середовища для двокомпонентних метало-діелектричних метаматеріалів НВЧ-діапазону і використав результати розробленої ним теорії ефективного середовища для створення математичного апарату, орієнтованого на розробку компактних прямокутних мікросмушкових антен НВЧ-діапазону з покращеними характеристиками. На особливу увагу заслуговує та частина теорії ефективного середовища, яка була створена для магнітних метаматеріалів і, особливо, феритів для роботи на частотах близьких до 1 ГГц». Останнє практично визначає актуальність обраного у дисертації діапазону частот.

Дуже важливим моментом у дисертації є наявність результатів експериментів, які виконані дисертантом і фактично є практичним обґрунтуванням

розроблених ним підходів і методів визначення параметрів ефективного середовища.

Тобто дисертаційна робота О. М. Рибіна присвячена розв'язанню *актуальної наукової проблеми*, яка полягає в розвитку методу ефективного середовища для двокомпонентних метало-діелектричних метаматеріалів і її використанні для мініатюризації прямокутних мікросмужкових антен НВЧ-діапазону.

Дисертаційна робота О. М. Рибіна є результатом узагальнення досліджень, проведених автором в період 2005-2017 рр. Частина цих досліджень виконувалася у період 2016-2017 рр. в рамках держбюджетної теми "Математична модель активних і пасивних багатofункціональних систем на основі метаматеріалів і анізотропних фотонних структур", номер державної реєстрації 22-14-16 (0116U000821) і держбюджетної теми "Компактна антенно-фідерна система з друкованих антен для радіолокації ближньої дії", номер державної реєстрації 29-14-17 (0117U0004854), що здійснюється в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна.

Наукова новизна рецензованої дисертаційної роботи. У даній дисертації було розвинуто НВЧ-теорію ефективного середовища для нерезонансних двокомпонентних метаматеріалів, що являють собою однорідні, ізотропні діелектричні матриці або середовища з періодично вбудованими в них металевими включеннями циліндричної і сферичної форм. Були розглянуті немагнітні і феромагнітні включення. Ця теорія показала, що у випадку немагнітних включень спостерігаються фізичні явища, які можуть супроводжуватися приростом дійсної частини ефективної відносної діелектричної проникності і зменшенням дійсної частини ефективної відносної магнітної проникності. Дисертантом уперше з'ясовано фізичні основи цих явищ.

У випадку феромагнітних включень розглядалося часткове і повне намагнічування зовнішнім постійним магнітним полем. Розвинута теорія ефективного середовища показала, що в залежності від орієнтації зовнішнього поля намагнічування і напрямку поширення первинної ЕМ-хвилі можуть спостерігатися фізичні явища, які супроводжуються приростом ефективної відносної магнітної проникності, низькими позитивними і навіть негативними її значеннями (точніше, її дійсної частини). У дисертації показано, що в

залежності від напрямку поширення первинної ЕМ-хвилі щодо напрямку зовнішнього намагнічування, такі метаматеріали можуть використовуватись при створенні альтернативних до вже існуючих фільтрів, конверторів фази і ретрансляторів ЕМ-хвиль НВЧ-діапазону, а також при створенні керованих селективних метаповерхонь НВЧ діапазону.

Важливою особливістю усіх розглянутих у даній роботі метаматеріальних середовищ (з магнітними і немагнітними включеннями) є наявність у них малих втрат майже в усьому розглянутому діапазоні частот.

Дисертантом було проведено експерименти, які не тільки значною мірою підвердили основні положення розробленої ним теорії, але й показали, що розглянуті у дисертації магнітні метаматеріали можуть бути використані для покращення характеристик дальнього поля мікросмужкових антен, а також для створення НВЧ-хвилеводів і резонаторів, альтернативних до вже існуючих.

У дисертації було запропоновано і розвинуто принцип мініатюризації прямокутних мікросмужкових НВЧ-антен із метаматеріальними підкладками на основі використання метало-діелектричних метаматеріалів. Дисертант зумів показати, що використання таких метаматеріалів для створення підкладок мікросмужкових антен дозволяє істотно мінімізувати антенний профіль (до 80%) з одночасним покращенням таких параметрів дальнього поля антени як коефіцієнт посилення за потужністю і коефіцієнт корисної дії. Крім того, дисертантом було також показано, що якщо підкладки антен складаються з двох шарів метаматеріалу так, що ефективна відносна діелектрична проникність утвореної підкладки більша за одиницю, а її відносна магнітна проникність близька до одиниці, то вдається досягти найбільших значень для коефіцієнта посилення за потужністю, а також коефіцієнта корисної дії та суттєво слабких інтенсивностей ближніх полів. Це важливо при проектуванні антен для гаджетів і при використанні їх у мобільному зв'язку.

Особливо важливим результатом досліджень дисертації є те, що згадані вище антени і антени з магнітними метаматеріальними підкладками можуть бути мультисмуговими і мультиспрямованими, тобто містять вторинні корисні гармоніки з випромінюванням у напрямках, відмінних від напрямків випромінювання головної гармоніки.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів. Слід відзначити, що дисертант достатньо уваги приділяє обґрунтуванню достовірності отриманих результатів. Оскільки у дисертаційній роботі автор отримує чимало результатів в аналітичному вигляді, то для їх перевірки і порівняння він використовує результати, отримані в часткових випадках іншими авторами. Крім того, для ряду ключових задач дисертант перевіряє отримані результати, використовуючи чисельне моделювання з залученням комерційного програмного забезпечення. Розроблені дисертантом підходи та методи побудови ефективного середовища значною мірою були підтверджені результатами експериментів, проведених самим дисертантом. Тому, я думаю, можна стверджувати, що отримані в дисертації наукові результати є достовірними і в достатній мірі обґрунтованими.

Практична значимість отриманих дисертантом результатів полягає у першу чергу в тому, що йому вдалося отримати достатньо прості моделі які можуть бути використані на практиці для розширення структури базових елементів та матеріалів НВЧ діапазону. Зокрема, ці результати можуть знайти застосування при синтезі штучних феритів, створенні принципово нових хвилеводів, фазообертачів, НВЧ-фільтрів і конверторів електромагнітних хвиль. Вони можуть мати суттєве значення при створенні компактних бездротових систем передачі електричної енергії в НВЧ-діапазоні з високими значеннями коефіцієнта корисної дії, а також при створенні мініатюрних мікросмушкових антен.

Підсумовуючи вищесказане, можна стверджувати, що дисертаційна робота О. М. Рибіна є завершеним науковим дослідженням, у якому отримані нові фундаментальні результати в галузі вивчення ефективних електромагнітних властивостей двокомпонентних метало-діелектричних метаматеріалів і їх застосувань в НВЧ-діапазоні. Тобто, по суті справи, у рецензованій дисертаційній роботі сформульовано новий напрям дослідження нерезонансних метаматеріалів у НВЧ-діапазоні методом теорії ефективного середовища.

Зміст дисертаційної роботи відповідає темі і паспорту спеціальності 01.04.03 – радіофізика. Дисертація і автореферат оформлені у відповідності до вимог Атестаційної колегії Міністерства освіти і науки України. Зміст автореферату дисертації у достатній мірі відображає основний зміст дисерта-

ційної роботи. Результати кандидатської дисертації О. М. Рибіна у докторській дисертації не використовуються.

Матеріали дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані у 27 статтях, більшість з яких надруковані у періодичних імпаکت-факторних зарубіжних наукових журналах. Також матеріали дисертації достатньо добре представлені на міжнародних конференціях та симпозіумах.

Проте робота має деякі недоліки:

1. У дисертаційній роботі автор подає числові значення ефективних електрофізичних характеристик метаматеріалів з точністю до чотирьох знаків після коми. Процедура отримання ефективних параметрів модельних метаматеріалів передбачає цілий ряд певних наближень, спрощень і припущень. Моє питання полягає у тому наскільки необхідна така точність. Адже навіть реальні відносні діелектрична і магнітна проникності твердих тіл з такою точністю не визначаються.

2. У дисертаційній роботі автор вказує, що для мініатюризації прямокутних мікросмужкових антен можуть бути використані лише розглянуті в роботі метаматеріали для створення підкладок. Проте я думаю, що для цього можуть бути використані будь-які нерезонансні метало-діелектричні метаматеріали, що можуть забезпечити необхідні значення ефективних відносних проникностей.

3. Для мене очевидно, що метало-діелектричних метаматеріалів можна використати не тільки для мініатюризації прямокутних мікросмужкових антен але й для мініатюризації колових мікросмужкових антен. Принаймні, це можна було зазначити у дисертації у якості припущення.

4. На мою думку, не зважаючи на достатній рівень закордонних журналів, де автор дисертації публікував результати своїх досліджень, дисертанту слід також звернути увагу на такі журнали, як «European Journal of Physics», «International Journal of Electrical Engineering Education», оскільки результати, отримані в роботі можуть бути і слід впровадити в навчальній процес по спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

Ці недоліки не впливають на загальну високу позитивну оцінку рецензованої дисертаційної роботи. Тому, підсумовуючи вищесказане, вважаю, що дисертаційна робота “Двокомпонентні метаматеріали і мікросмужкові антени

на їх основі” повністю відповідає вимогам Атестаційної колегії Міністерства освіти і науки України до докторських дисертацій, а її автор О. М. Рибін заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент,
завідувач відділом фізичних основ діагностики матеріалів
Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України,
лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки,
старший науковий співробітник,
доктор фізико-математичних наук



Д. Б. Куриляк

Підпис доктора фіз.-мат. наук, ст. наук. співробіт. Д.Б. Куриляка засвідчую.

Вчений секретар
Фізико-механічного інституту
ім. Г. В. Карпенка НАН України
17 травня 2018 р.



В. В. Корній