

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Івженко Любові Ігорівни
«Спектральні властивості анізотропних дротяних метаматеріалів мікрохвильового
діапазону»

подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних
наук за спеціальністю 01.04.03 – *радіофізика*

Вивченню електромагнітних властивостей штучних середовищ (метаматеріалів) приділяється постійна увага. Їм притаманно багато електромагнітних властивостей, які не виявлені у природних середовищах, та які залежать від типу композиційних елементів, що і формують метаматеріал. Зокрема, на сьогодні інтерес викликають метаматеріали, які демонструють властивості штучних діелектриків з просторовою анізотропією. Цей інтерес обумовлений тим, що в природі анізотропні середовища зустрічаються частіше, ніж середовища, матеріальні параметри яких однаково не залежні від напрямку поширення електромагнітної хвилі. Ці властивості виявляються корисними, наприклад, при розробці різних пристроїв, які поширюють електромагнітну енергію; при розробці різних маскуючих покриттів, розробці засобів ближньохвильової мікроскопії та ін.

Вивчення штучних діелектриків, на прикладі масиву металевих дротів, почалося ще більше половини століття тому. Проте, починаючи з 90-х років ХХ ст., у такому штучному діелектрику, з притаманними йому властивостями штучної плазми з ефективним показником заломлення, виявлено ряд фундаментальних властивостей, таких як: можливість передачі зображення із надроздільною здатністю, явище негативної рефракції та ін. Відзначимо, що резонансна природа дротяних включень, з яких сформовано штучний діелектрик, вносить обмеження до робочому діапазону частот, в межах якого має місце фізичне явище. У спеціально спроектованих метаматеріалах це обмеження можна зменшити, наприклад, додаванням зовнішніх електричних (магнітних) полів або використанням у структурі метаматеріалу елементів із перебудовою, тобто можлива зміна геометрії і форми самих елементів. На теперішній час недостатньо розроблено способів, які б дозволили керувати спектральними і дисперсійними властивостями в метаматеріалах, особливо для такого їх різновиду як анізотропні дротяні метаматеріали. Електродинаміка анізотропних дротяних метаматеріалів із переналаштуванням, до теперішнього часу, розвинена у недостатній мірі і вимагає додаткових досліджень як теоретичних, так і експериментальних. Тому в останні роки ведеться активний пошук перспективних підходів (методів), які б забезпечили можливість ефективного керування спектральними властивостями анізотропних метаматеріалів. Дисертація Івженко Л.І., на мій погляд, є досить помітним внеском у розвиток досліджень цього напрямку.

Мета дисертаційної роботи полягає у встановленні особливостей впливу просторового розташування елементів, тобто форми елементарної комірки, на спектральні властивості анізотропних дротяних метаматеріалів. Отримані знання поглиблюють *фундаментальні* уявлення про електродинаміку анізотропних дротяних метаматеріалів. З *прикладної* точки зору – вони розширили існуючу на сьогодні базу штучних середовищ із перебудовою для розробки нових керованих функціональних пристроїв.

Таким чином, *тема дисертації є актуальною*. У дисертації збалансовано представлені результати експериментального та теоретичного дослідження.

Наукову новизну містять усі розділи дисертаційної роботи. Серед найбільш вагомих наукових результатів вважаю необхідним відмітити наступні:

1. Для реєстрації в мікрохвильовому діапазоні просторового розподілу поля еванесцентних мод в анізотропних метаматеріалах розроблена експериментальна методика, що забезпечує амплітудно - фазові дослідження у режимі реального часу завдяки сконструйованим активним зондам, скануючим пристроям та спеціально створеним комп'ютерним програмам інтегрованим з векторним аналізатором кіл.

2. Експериментально продемонстрована можливість досягнення в мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль роздільної здатності близько $\lambda/15$ для двох окремих точкових джерел у дротяному метаматеріалі.

3. Запропоновано експериментальний підхід до керування зонними характеристиками спектру проходження анізотропного дротяного метаматеріалу за допомогою зміни параметрів його елементарної комірки механічним шляхом.

4. Продемонстровано сценарій перетворення електромагнітних властивостей плазмopodobного середовища у властивості, що відповідають фотонному кристалу міліметрового діапазону довжин хвиль у дротяному метаматеріалі з механічною перебудовою.

5. Вперше експериментально встановлено, що в метаповерхні з механічною перебудовою елементарної комірки косокутової форми ефект резонансного відбиття проявляється у вигляді одиночного мінімуму в спектрі проходження, частота якого в діапазоні 22-40ГГц однозначно обумовлена кутом схрещування елементарної комірки.

Треба підкреслити, що *результати, основні положення та висновки є науково обґрунтованими*, передусім тому, що вони базуються на відомих методах теоретичних розрахунків та на експерименті. *Достовірність* експериментальних результатів з дослідження спектральних електромагнітних властивостей анізотропних дротяних метаматеріалів у міліметровому діапазоні довжин хвиль підтверджується апробованими методами НВЧ спектроскопії, надійним сучасним обладнанням, перевіркою розрахунків експериментами.

Результати *в повній мірі опубліковані в наукових спеціалізованих виданнях*, а саме – в 14 друкованих працях: з них 5 статей в наукових фахових виданнях, 9 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій та симпозіумів. *Положення автореферату і дисертації є ідентичними*.

Робота побудована таким чином, що у **першому розділі** роботи розглянуто специфічні фундаментальні явища, які мають місце у дротяних середовищах, а саме: можливість передачі зображень із надроздільною здатністю на значні відстані, явище негативної рефракції, відповідність дротяного середовища електромагнітним властивостям фотонного кристалу та ін. Автором обґрунтована необхідність вивчення штучних середовищ (метаматеріалів), основу яких складає анізотропне дротяне середовище, оскільки характеристиками частотного спектру таких середовищ можна керувати за допомогою зміни (перебудови) форми елементарної комірки.

У **другому розділі** проаналізовано особливості методик експериментальних досліджень, які використовуються та розроблені дисертантом. Зокрема, автором наведено детальний опис дослідження у міліметровому діапазоні довжин хвиль просторового розподілу поля згасаючих мод; особливості експериментальних пристроїв (автоматизованого сканеру розподілу мікрохвильового поля, ін., що розроблено в ході реалізації цих методик). Цим самим обумовлено достовірність експерименту.

Наступний, **третій розділ** присвячено дослідженню впливу просторового розташування дротяних елементів на конфігурацію НВЧ поля у безпосередній близькості від анізотропних метаматеріалів. Експериментально продемонстрована можливість дротяною лінзою здійснювати концентрацію електромагнітної енергії поля у малому об'ємі простору в міліметровому діапазоні довжин хвиль. Проаналізовано й типи пасивних зондів, які використані в ряді експериментів та обрано оптимальні параметри таких зондів (їх матеріал, форма.). Обумовлено умови використання в експерименті та переваги "активного зонду", для досліджень в області ближніх полів. Проаналізовано експерименти, що доводять можливість передачі дротяною лінзою зображення із надроздільною здатністю, яка перевищує дифракційний ліміт у мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль.

У останньому **четвертому розділі** автором обґрунтовані принципи керування характеристиками спектру анізотропних дротяних метаматеріалів, де завдяки зміні розміру і форми елементарної комірки механічним шляхом досягнуто розширення робочого діапазону частот у мікрохвильовому діапазоні. Експериментально та численно продемонстровано керування дисперсійними та зонними характеристиками спектру проходження анізотропних дротяних метаматеріалів. Встановлено, що з ростом частоти, в спектрі проходження анізотропного дротяного метаматеріалу відбувається утворення нових заборонених зон, які вказують на те що така структура набуває властивостей "фотонного кристалу".

При дослідженні анізотропного планарного метаматеріалу з механічною перебудовою формуючих його елементів знайдено, що явище резонансного відбиття проявляється у вигляді одиночного мінімуму у частотному спектрі проходження. Автором показано, що природа такого резонансного мінімуму проходження зумовлена косокутовою формою елементарної комірки. Отримано цікаві експериментальні результати щодо впливу на спектр проходження відстані поміж дротами та їх кута схрещення.

Усі результати, одержані в роботі, є безумовно новими. На мій погляд, **найбільш цікавими результатами** можна вважати такі:

– вперше експериментально встановлено, що в метаповерхні з механічною перебудовою елементарної комірки косокутової форми ефект резонансного відбиття проявляється у вигляді одиночного мінімуму в спектрі проходження, частота якого в діапазоні 22-40 ГГц однозначно обумовлена кутом схрещування елементарної комірки.

- за допомогою числового моделювання показано, що величиною плазмової частоти дротяного метаматеріалу з магнітним заповненням можна ефективно керувати за допомогою зовнішнього магнітного поля

Матеріали дисертації Л.І. Івженко досить повно розкриті в наукових статтях. Дисертація добре написана і оформлена відповідно до стандартів. Але вона **не є вільною від недоліків**:

1. Мають місце помилки, термінологічні та стилістичні похибки: текст дисертації перевантажений англомовними термінами.
2. Під час експериментального дослідження спектральних властивостей структури, представленої як масив металевих смужок на діелектричному субстраті, не розглянуто випадок поздовжньої складової хвильового вектора, де Е-вектор направлений уздовж вісі смужок, що, на мою думку, недостатньо для отримання надійних кількісних результатів, (див. с. 68, рис. 3.1 д).
3. Не повністю розкритий механізм утворення просторової дисперсії в анізотропних дротяних метаматеріалах (стр. 83).

Втім, зазначені зауваження не знижують цінності представленої дисертаційної роботи і не впливають на загальну позитивну оцінку роботи. Дисертація Івженко Л.І. є завершеною науковою працею, яка виконана на високому науковому рівні. Її зміст повністю розкриває тему дослідження. В дисертації вирішено важливу наукову задачу в електродинаміці анізотропних метаматеріалів із перебудовою, а саме: встановлено особливості впливу на спектральні властивості анізотропних дротяних метаматеріалів зміни форми елементарної комірки механічним шляхом.

Таким чином, вважаю, що за актуальністю вибраного напрямку роботи, обсягом виконаних досліджень, рівнем і кількістю наукових публікацій, новизною та практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна робота Івженко Л.І. **задовольняє** всім вимогам, які ставляться МОН України до кандидатських дисертацій, діючого «Порядку присудження наукових ступенів». Автор роботи, Івженко Любов Ігорівна, **заслуговує** присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук, професор,
завідуючий відділом теоретичної радіофізики
Радіоастрономічного інституту НАН України

Просвірнін С.Л.

Підпис доктора фізико-математичних наук, професора, завідуючого відділом
С.Л. Просвірніна засвідчую.

Вчений секретар РІ НАНУ
кандидат фізико-математичних наук

« 10 » листопада 2017 г.



Удовенко А.П.