

## ВІДГУК

офіційного опонента кандидата фізико-математичних наук, доцента Федоріна Іллі Валерійовича на дисертаційну роботу Івженко Любові Ігорівни «СПЕКТРАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ АНІЗОТРОПНИХ ДРОТЯНИХ МЕТАМАТЕРІАЛІВ МІКРОХВИЛЬОВОГО ДІАПАЗОНУ ДОВЖИН ХВИЛЬ», представленої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

### Актуальність теми дисертації

Великий прогрес в мікро- та наноелектроніці, інформаційних технологіях та оптоелектроніці, який має місце останнім часом, пов'язаний, перш за все, з використання нових, штучно створюваних композитних структур, що мають електродинамічні властивості, які недосяжні в жодному природному матеріалі. Особливо перспективними в цьому відношенні виглядають наноструктури, зокрема, періодичні наноструктури, тобто багатошарові системи, що виготовлені з матеріалів різної фізичної природи, а саме діелектриків, металів, напівпровідників, надпровідників, магнетиків, тощо. Макроскопічні електродинамічні властивості таких багатошарових систем суттєво відрізняються від властивостей матеріалів, з яких вони складаються, що значно розширює можливості їх практичного застосування. Таким чином, тонкоплівкові шарувато-періодичні структури у довгохвильовому наближенні є важливим з практичної точки зору об'єктом дослідження завдяки можливості їх застосування у різних діапазонах частот: від області надвисоких частот до області рентгенівського випромінювання.

Особливо цікавими ці об'єкти стають у тих випадках, коли у подібних штучних матеріалах починають діяти незвичні закони заломлення та відбиття, такі як негативне заломлення, ефекти суперлінзи та суперпризми, тощо, що інтенсивно досліджуються останнім часом у метаматеріалах з негативною діелектричною та/або магнітною проникністю.

Дисертаційну роботу Івженко Л.І. присвячено аналізу електродинамічних властивостей анізотропних дротяних метаматеріалів мікрохвильового діапазону довжин хвиль. Основним напрямком дисертаційного дослідження є вивчення впливу просторової конфігурації та геометрії елементарної комірки на спектральні властивості анізотропних метаматеріалів. За для цього, в роботі розроблено експериментальну методику дослідження, що дозволяє реєструвати просторовий розподіл поля еванесцентних (згасаючих) мод у ближньому полі. Експериментально продемонстровано можливість передачі зображення із здатністю, що перевищує дифракційну межу, використанням дротяного метаматеріалу. Експериментально та чисельно продемонстровано можливість керування електродинамічними властивостями анізотропних дротяних метаматеріалів, змінюючи форму та розмір елементарної комірки, впливом зовнішніх полів, тощо.

Таким чином, зміст дисертаційної роботи, перспективність практичного застосування, ступінь міжнародного наукового інтересу до тематики дослідження свідчить про актуальність теми дисертації.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

Новизна основних наукових результатів полягає в тому, що вперше експериментально та чисельно проаналізовані електродинамічні властивості анізотропних метаматеріалів мікрохвильового діапазону довжин хвиль, а саме:

- 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;

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

- запропоновано експериментальний підхід до керування зонними характеристиками спектру проходження анізотропного дротяного метаматеріалу за допомогою зміни параметрів його елементарної комірки механічним шляхом;

- продемонстровано сценарій перетворення електромагнітних властивостей плазмоподібного середовища у властивості, що відповідають фотонному кристалу міліметрового діапазону довжин хвиль у дротяному метаматеріалі з механічною перебудовою;

- 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;

### **Ступінь обґрунтування та достовірність результатів дисертації**

Наукові положення дисертації, її висновки та рекомендації є науково обґрунтованими. Використані наближення та припущення є традиційними для досліджень такого роду і неодноразово апробовані раніше. Отримані експериментальні результати та результати моделювання дають правильні граничні переходи до відомих результатів. Основні наукові результати, які представлені в роботі, мають чітку та наочну фізичну інтерпретацію, добре проілюстровані, теоретично обґрунтовані, логічно не суперечливі та добре корелюють з загальними експериментальними та теоретичними уявленнями радіофізики твердого тіла.

Достовірність отриманих результатів підтверджується також тим, що вони не суперечать відомих науковим положенням та законам. Результати дисертації пройшли добру апробацію на наукових вітчизняних та міжнародних

конференціях, а основні статті за темою дисертації опубліковано у відомих наукових виданнях, які відрізняються достатньо прискіпливим підходом до рецензування матеріалів, що надсилаються авторами.

### **Публікації по темі дисертації та її оформлення**

Основні матеріали дисертації опубліковані в 14 наукових працях, в тому числі 5 статей в реферованих фахових вітчизняних та закордонних журналах, які входять до міжнародних баз даних SCOPUS та/або Web of Science, збірках праць та тезах доповідей. Зміст дисертації у цих публікаціях відбитий повністю. Положення автореферату і дисертації є ідентичними. Автореферат містить стислий опис дисертації по розділам. Дається опис методик і результатів дослідження, наведено висновки по роботі. Основні отримані результати роботи відповідають поставленій меті роботи.

Дисертаційна робота Івженко Л.І. складається з чотирьох розділів.

Перший розділ – огляд літератури з електродинаміки шарувато-періодичних структур та метаматеріалів. Автор, простежуючи історію цього напрямку, зосередив свою увагу на так званому «методі ефективного середовища», що дозволяє в довгохвильовому наближенні звести композитну систему до однорідної, що володіє деякими ефективними діелектричними та магнітними проникностями. Приділено увагу застосуванню метаматеріалів в сучасних оптичних приладах, телекомунікаційній та лазерній техніці.

Другий розділ – присвячено опису експериментальної методики дослідження в міліметровому діапазоні довжин хвиль просторового розподілу електромагнітного поля, для чого була розроблена спеціальна експериментальна установка. Дана експериментальна методика дозволила реалізувати процес реєстрації електромагнітних полів за допомогою як «пасивного» (пробне тіло), так і «активного» (резонансний диполь) зондів.

У третьому розділі експериментально та чисельно, за допомогою програм комп'ютерного моделювання, вивчені особливості поширення електромагнітних хвиль сантиметрового і міліметрового діапазону в анізотропних дротяних метаматеріалів з різною конфігурацією дротяних елементів.

Четвертий розділ присвячено вивченню спектральних та дисперсійних властивостей механічно керованих анізотропних дротяних метаматеріалів.

Загалом, матеріал у дисертації викладено стисло, чіткою науковою мовою, стиль її викладення послідовний та логічний. Комп'ютерний набір матеріалів, а також друк і розміщення малюнків відповідають стандартам на оформлення текстової документації.

### **Практичне значення отриманих результатів та рекомендації щодо їх використання**

Практична цінність роботи полягає в тому, що розв'язані в ній задачі можуть стати основою, на якій можлива побудова ефективної методики розрахунку ряду специфічних пристроїв і дослідження різноманітних штучних матеріалів у мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль.

Результати дисертаційної роботи доповнюють існуючі фундаментальні знання про поширення електромагнітних хвиль в анізотропних дротяних метаматеріалах. Композитні матеріали у довгохвильовому наближенні є перспективними для використання в лазерній техніці, оптиці, пристроях передачі зображень, широкосмугових НВЧ-поглиначах і поляризаторах, засобах ближньопольової мікроскопії. Ці перспективи посилюються тим, що наявність штучної анізотропії дозволяє керувати частотно-селективними, спектральними та поляризаційними властивостями за допомоги вибору матеріалів, товщин шарів, величиною зовнішнього магнітного поля, тощо.

### **Недоліки дисертації**

Потрібно зауважити, що дисертація має ряд недоліків, які заслуговують на обговорення:

Маю наступні зауваження до змісту дисертаційної роботи:

1. Аналітичний огляд, на мою думку, містить досить багато загальної, неспецифічної до тематики дослідження інформації, та складає майже третину від об'єму основних частин дисертації.

2. Зважаючи на те, що робота має велику кількість чисельних та експериментальних досліджень, особистий внесок автора, на мою думку, відображений не достатньо очевидно. Наприклад, у третьому та четвертому розділах не зрозуміло, чи виконував автор чисельне моделювання (постановка та проведення чисельного експерименту, вибір фізичної моделі, граничних умов, рівнянь, обробка результатів чисельного експерименту, тощо.).

3. Зважаючи на те, що робота має експериментальний характер, а при проведенні чисельних досліджень було використано низку допущень, було б добре вказувати довірчі інтервали проведених вимірювань, вказувати точність вимірювання розмірів матеріалів, які наведені у роботі точними даними, без можливих похибок. Виходячи з цього, який можливий розмір цих похибок, як він співвідноситься до характерних розмірів системи, що розглядається, та який вплив на результат це може дати?

4. В чому фізичне пояснення розглянутого в роботі впливу зовнішнього магнітного поля на електродинамічні властивості метаматеріалу? Як напрямок прикладеного зовнішнього магнітного поля можливо буде впливати на розглянуті ефекти?

5. У роботі не завжди надаються повні фізичні параметри матеріалів, які використовувались при створенні експериментальних зразків, а саме: параметри магнітних матеріалів, концентрація носіїв заряду, робоча температура, величина втрат. Як втрати у матеріалах впливають на отримані результати, обґрунтованість застосування теорії ефективного середовища та на узгодженість теорії та експерименту?

### **Загальний висновок**

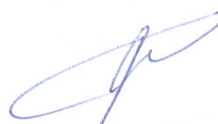
Втім, зазначені зауваження не зменшують загальну позитивну оцінку рецензованої дисертаційної роботи та не стосуються отриманих результатів і

висновків роботи. Ці результати у сукупності дають розв'язок наукової задачі, пов'язаної з експериментальним вивченням електродинамічних властивостей анізотропних метаматеріалів мікрохвильового діапазону довжин хвиль, яка має суттєве значення для теоретичної і прикладної радіофізики фізики твердого тіла. Дослідження виконане в області фізики, що прогресує та визначає сучасний стан низки суміжних областей науки та техніки. Подана до захисту робота є самостійним і завершеним науковим дослідженням, яка виконана на високому науковому рівні. Нові результати були отримані з використанням достатньо обґрунтованих теоретичних методів та експериментальних підходів. Їх аналіз і фізичне трактування не дають приводів для сумніву в їх достовірності, науковому та практичному значенні.

Вважаю, що дисертаційна робота Івженко Л.І. «Спектральні властивості анізотропних дротяних метаматеріалів мікрохвильового діапазону довжин хвиль» по своїй значущості, обсягу і актуальності відповідає всім вимогам, які ставляться МОН України до кандидатських дисертацій, діючого «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор, Івженко Любов Ігорівна, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент:

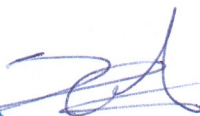
кандидат фізико-математичних наук,  
доцент кафедри фізичного матеріалознавства  
для електроніки та геліоенергетики  
Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут»



І.В. Федорін

Підпис кандидата фізико-математичних наук,  
доцента кафедри фізичного матеріалознавства  
для електроніки та геліоенергетики  
Федоріна І.В. засвідчую:

вчений секретар НТУ «ХПИ»



О.Ю. Заковоротний

13 листопада 2017 р.

