

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Полевого Сергія Юрійовича

«Електромагнітні властивості керованих метаповерхонь

мікрохвильового діапазону та їхнє застосування»,

яку подано на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика

Дисертаційна робота Полевого С.Ю., виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, присвячена дослідженню особливостей взаємодії електромагнітних хвиль з метаматеріалами в мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль та розвитку і вдосконаленню методів керування властивостями таких метаматеріалів. Значну частину роботи складає дослідження метаповерхонь, які також відомі як пласкі метаматеріали (та ще й такі, до яких включені елементи з магнетиків). На таких метаповерхнях можуть збуджуватися резонансні коливання, які інтенсивно взаємодіють з електромагнітним випромінюванням, що дозволяє контролювати амплітуду та поляризацію хвиль, що проходять крізь метаповерхню. Якщо у їх складі є матеріали, здатні змінювати свої параметри під впливом зовнішніх впливів, таких як електричне або магнітне поле, то з'являється можливість створення керованих метаповерхонь, що можуть змінювати свої електромагнітні властивості. Такі керовані метаповерхні зазвичай є компактними, що є перевагою при розробці пристроїв на їх основі. При цьому, гнучкість у регулюванні властивостей метаповерхонь забезпечує швидке налаштування таких пристроїв. Керування завдяки магнітному полю уявляється особливо цікавим.

Отже, можна стверджувати, що обраний науковий напрямок досліджень є актуальним, оскільки він дозволяє розширити знання в галузі фізики електромагнітних метаповерхонь і створювати на їх основі керовані пристрої нового покоління, які є компактнішими за існуючі аналоги. Крім того, актуальність

роботи підтверджується участю автора дисертації у двох міжнародних проектах, де досліджено практичні застосування плоских метаматеріалів для систем безпеки та квантових технологій.

Обґрунтованість результатів дисертаційної роботи підтверджується використанням перевірених методів для теоретичних та чисельних розрахунків, а також сучасних методик експериментальних досліджень. Чисельні розрахунки електромагнітних властивостей гіротропних метаповерхонь виконані методом інтегральних функціоналів і добре узгоджуються з експериментальними даними. Дисперсійні властивості топологічних ізоляторів розраховані в частотній області за допомогою добре апробованої програми MIT Photonic Bands (MPB), а спектри планарних мікрохвильових резонаторів з магнітними елементами – з використанням програми чисельного моделювання CST Studio Suite. Експериментальні дослідження проводилися з використанням перевірених і апробованих методик вимірювання. Наприклад, вимірювання спектральних властивостей метаповерхонь у відкритому просторі проведено за допомогою векторного аналізатора кіл. Магніторезонансні властивості феритових зразків у хвилеводі та поблизу планарних резонаторів були зареєстровані за допомогою магнітного НВЧ радіоспектрометра, що дозволило отримати якісне узгодження з чисельними розрахунками. Отже, вважаю, що результати, представлені в дисертації, є обґрунтованими та достовірними.

Структурно дисертація складається зі вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел та одного додатку. Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої проблеми підвищення ефективності керування електромагнітними властивостями метаповерхонь в мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль. У дисертації можна виділити кілька нових результатів, які, на мою думку, є найбільш цікавими і представлені в науковій новизні роботи:

1. Вперше в мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль для феродіелектричної метаповерхні на основі паралелепіпедів експериментально продемонстровано посилення ефекту Фарадея на резонансній частоті.

Експериментально встановлено, що поблизу цієї частоти метаповерхня повертає площину поляризації хвилі, що пройшла крізь неї, на кут до 90° .

2. У мікрохвильовому діапазоні експериментально й чисельно проаналізовано вплив форми субхвильових канавок на поверхні феритової пластини на частоту феромагнітного резонансу (ФМР). Вперше пояснено механізм зростання частоти ФМР зі збільшенням глибини канавок, що обумовлено впливом розмагнічуючих факторів структурованого фериту. Визначено діапазон магнітних полів, при яких залежність частоти ФМР від глибини канавок стає монотонною.

3. Чисельно показана можливість переналаштовувати резонансну частоту поверхневих станів магнітоактивної муарової метаповерхні з гексагональною елементарною коміркою шляхом зміни напруженості зовнішнього магнітного поля. Вперше для метаповерхні на основі ефекту муару експериментально й чисельно продемонстровано управління частотою моди поверхневого стану шляхом зміни кута схрещування двох утворюючих метаповерхню періодичних структур з гексагональною елементарною коміркою.

4. Вперше чисельно продемонстровано ефективне регулювання шириною забороненої зони комбінованого електромагнітного аналога топологічного ізолятора, сформованого двоперіодичним гексагональним масивом еліптичних циліндрів із кварцу, шляхом вибору напрямку одноосьової анізотропії кварцу. Також розроблена методика ефективного управління частотами поверхневих станів для комбінованого топологічного ізолятора, сформованого двома вищезгаданими структурами з різними параметрами елементарної комірки.

Особливу цікавість викликає магнітоактивна муарова метаповерхня, що, на мій погляд, має гарні перспективи практичного застосування.

Результати дисертації мають суттєве значення як для теоретичної, так і для прикладної науки. З точки зору фундаментальної науки проведені дослідження розширюють відомі дані про особливості електромагнітних властивостей метаповерхонь мікрохвильового діапазону, які можуть ефективно переналагоджуватися за допомогою передусім зовнішнього магнітного поля, а

також і механічним способом. Наприклад, деякі розглянуті метаповерхні демонструють широкосмугове налаштування спектральних характеристик, незалежний від поляризації відгук і значне підсилення ефекту Фарадея. Автором продемонстровано, що комбінування різних підходів до керування електромагнітними властивостями, зокрема, на прикладі муарових метаповерхонь, забезпечує більшу гнучкість у керуванні цими властивостями.

З точки зору прикладної науки, проведені дослідження відкривають можливості для поліпшення характеристик існуючих пристроїв мікрохвильового діапазону. Наприклад, на основі гіротропних метаповерхонь можуть бути розроблені компактні пристрої, такі як керовані магнітним полем поляризатори, що використовують ефект Фарадея. Також, за допомогою електромагнітних аналогів топологічних ізоляторів можна керувати як величиною, так і напрямком поширення хвиль на їхніх границях шляхом вибору напрямку кругової поляризації збуджувальної хвилі. При цьому магнітний спосіб керування є більш перспективним, на мій погляд. Нарешті, розглянуті самокомплементарні метаповерхні, що підтримують поширення вироджених і ортогональних за поляризацією хвиль, можуть бути корисними у високочутливих сенсорах та випромінювачах ближнього поля.

З точки зору прикладних досліджень результати роботи є багатообіцяючими. Зокрема, в магнітних метаповерхнях, що демонструють ефект муару, замість традиційних магнетиків перспективним вважаю використання магнетиків з регульованим внутрішнім антиферромагнітним впорядкуванням структури.

Ще одним перспективним втіленням метаповерхонь представляється вивчення підсилення ефекту Фарадея в ГГц–ТГц діапазонах з використанням наноманетиків (наприклад, *synthetic antiferromagnet nanodisks*), де можуть бути збуджені різні типи спінових хвиль.

Така модифікація може забезпечити принципове збільшення функціональності магнітокерованих метаповерхонь, що розроблятимуться в майбутньому.

Дисертаційна робота безумовно є вагомою та насиченою результатами. Проте, слід зазначити, що вона не є вільною від недоліків та зауважень. А саме:

- На мій погляд в дисертаційній роботі бажано було б навести більше аналітичних моделей досліджуваних структур. Не зазначено, для яких структур можливо побудувати такі моделі, а для яких – ні.

- Більшу увагу можна було б приділити дослідженню метаповерхонь, що містять не тільки ферити, що вже добре зарекомендували себе, але різні типи сучасних магнітних наноструктур. Це значно підвищить прикладне значення результатів, особливо у найближчому майбутньому.

Однак, вказані недоліки не впливають на достовірність та обґрунтованість отриманих результатів, новизну та актуальність дисертаційної роботи, та не зменшують загальну позитивну оцінку проведених в дисертаційній роботі досліджень.

Автором опубліковано 38 робіт, в яких повністю викладено основні результати досліджень, що наведено в дисертації. Серед них є 16 наукових статей, в тому числі 5 в таких спеціалізованих журналах, що відносяться до квантилів Q1 та Q2 за класифікацією Scimago Journal and Country Rank: “Applied Physics Letters”, “Journal of the Optical Society of America B”, “Optics Letters”, “IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters”, тощо. Також результати досліджень доповідались на міжнародних конференціях, за результатами яких опубліковано 22 тези доповідей.

Дисертаційна робота Полевого С.Ю. досить добре структурована, містить нові результати і висновки, які чітко сформульовані. За змістом вона відповідає паспорту спеціальності 01.04.03 – радіофізика. Вважаю, що вона є завершеною науковою працею, оформлена відповідно до правил для дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук та відповідає п.7-9 вимог «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою

Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197. Всі ідеї інших авторів, що згадуються в дисертації, мають посилання на відповідне адекватне джерело. В дисертації немає академічного плагіату, фабрикації та фальсифікації результатів досліджень. Автореферат дисертації відповідає її змісту і оформлений відповідно до чинних вимог.

Таким чином, вважаю, що автор дисертаційної роботи Полевой Сергій Юрійович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук, професор,

член-кореспондент НАН України

директор Інституту магнетизму

імені В.Г. Бар'яхтара НАН України



Олександр ТОВСТОЛИТКІН